



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE
INGENIERÍA AERONÁUTICA Y DEL ESPACIO

**CARACTERIZACIÓN DEL ACABADO SUPERFICIAL
EN LA INDUSTRIA AERONAUTICA Y
AEROESPACIAL: DESARROLLO DE SOFTWARE
PATRÓN DE REFERENCIA DE ACUERDO A LA
NORMA ISO 5436: VISUALSR2D**

IGNACIO PARICIO ALCALÁ

TUTOR ACADÉMICO: ALFREDO SANZ LOBERA

CIENCIAS Y TECNOLOGÍAS AEROESPACIALES

2013/2014

CONTENIDO

Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. La Norma ISO 5436-2.....	7
2.1 Introducción	7
2.2 La Norma ISO 5436-2	7
2.3 Formato de Archivos para Datos de Referencia de Tipo F1	8
2.4 Registros del Fichero <i>.smd</i> de Acuerdo a la Norma.....	9
2.4.1 Registro 1 – Cabecera	9
2.4.2 Registro 2 – Otra información (opcional y no obligatoria)	12
2.4.3 Registro 3 – Datos	14
2.4.4 Registro 4 – Suma de verificación: <i>Checksum</i>	15
2.5 Comentarios Finales sobre la Norma ISO 5436	18
Capítulo 3. Desarrollos de la norma ISO 5436-2.....	21
3.1 Introducción	21
3.2 Algoritmo del NIST	23
3.2.1 Base de datos 2D del <i>NIST</i>	24
3.2.2 Herramientas de análisis 2D del <i>NIST</i>	24
3.2.3 Comentarios acerca del algoritmo del <i>NIST</i>	28
3.3 El Software del NPL.....	30
3.3.1 Base de datos de referencia de <i>Softgauges</i>	31
3.3.2 Algoritmo de referencia de <i>Softgauges</i>	32
3.3.3 Convertidor de archivos del <i>NPL</i>	38
3.3.4 Comentarios acerca de <i>Softgauges</i>	40
3.4 El Software del PTB.....	42
3.4.1 Algoritmo de referencia del <i>PTB</i>	47
3.4.2 Comentarios acerca de <i>RPTB</i>	51
Capítulo 4. <i>VisualSR2D</i>	53
4.1 Introducción, Filosofía y Etapas en el Desarrollo de <i>VisualSR2D</i>	53
4.1.1 Primera etapa: Herramientas de análisis 2D	53
4.1.2 Segunda etapa: Aplicación de la Norma ISO 5436-2.....	55
4.1.3 Evolución cronológica de <i>VisualSR2D</i>	55

4.2	Implementación y Distribución	59
4.3	Aplicación de la Norma ISO 5436-2 en <i>VisualSR2D</i>	64
4.3.1	Carga de archivos <i>.smd</i> en <i>VisualSR2D</i>	64
4.3.2	<i>VisualSR2D .smd Generator</i>	69
4.3.3	Módulo de exportación de perfiles filtrados	70
4.3.4	Comentarios acerca del enfoque de aplicación de la Norma ISO 5436-2 en <i>VisualSR2D</i>	70
Capítulo 5.	Base Teórica de las Herramientas de Análisis de <i>VisualSR2D</i>	73
5.1	Parametrización.....	73
5.1.1	Introducción	73
5.1.2	Parámetros de Amplitud.....	74
5.1.3	Parámetros de Espaciado: RSm	75
5.1.4	Parámetros de Forma	78
5.1.5	Implementación del Módulo Parámetros en <i>VisualSR2D</i>	80
5.1.6	Comparativa de Resultados del Módulo Parámetros con el <i>NIST</i> , Algoritmo de Referencia	81
5.2	Introducción al Filtrado: El Filtrado en la Ingeniería	85
5.2.1	Conceptos generales sobre el filtrado.....	85
5.2.2	Evolución Histórica	86
5.2.3	Evolución tecnológica	87
5.3	Filtrado en el Dominio de la Frecuencia	88
5.3.1	Consideraciones generales acerca del filtrado en el dominio de la frecuencia	88
5.3.2	Análisis en el dominio de la frecuencia	89
5.3.3	Filtro de longitudes de onda	91
5.3.4	Filtrado del perfil.....	92
5.3.5	Implementación del módulo Filtrado en el Dominio de la Frecuencia y el módulo de exportación de perfiles filtrados en <i>VisualSR2D</i>	94
5.4	Filtro Gaussiano	98
5.4.1	Consideraciones generales acerca del filtro Gaussiano	98
5.4.2	Filtrado mediante Convolución	100
5.4.3	Filtrado mediante transformada de Fourier, FFT	100
5.4.4	Implementación del filtro Gaussiano en <i>VisualSR2D</i>	101
5.4.5	Comparativa de resultados del módulo Filtro Gaussiano con el algoritmo de referencia del <i>NIST</i>	102

5.5	Filtro 2RC	104
5.5.1	Consideraciones generales acerca del filtro 2RC	104
5.5.2	Implementación del filtro 2RC en <i>VisualSR2D</i>	106
5.5.3	Comparativa entre el filtro 2RC y el filtro Gaussiano	109
5.5.4	Comparativa de resultados del módulo Filtro 2RC con el algoritmo de referencia del <i>NIST</i>	112
5.6	Filtrado y Parametrización. Análisis de Resultados: <i>NIST</i> vs <i>VisualSR2D</i> 113	
5.7	Autocovarianza y Autocorrelación	119
5.7.1	Conceptos generales de las funciones ACV y ACF	119
5.7.2	Implementación del módulo <i>Correlation</i> en <i>VisualSR2D</i>	122
5.7.3	Comparativa de resultados del módulo Correlación con el algoritmo de referencia del <i>NIST</i>	123
5.8	Densidad Espectral de Potencia	126
5.8.1	Conceptos generales sobre la Densidad Espectral de Potencia.....	126
5.8.2	Implementación del módulo PSD en <i>VisualSR2D</i>	129
5.8.3	Comparativa de resultados del módulo Densidad Espectral de Potencia con el algoritmo de referencia del <i>NIST</i>	133
5.9	Curva de Abbott – Firestone.....	135
5.9.1	Curva de Abbott – Firestone: base teórica.....	135
5.9.2	Implementación del módulo <i>BAC</i> en <i>VisualSR2D</i>	137
5.9.3	Comparativa de resultados del módulo <i>Bearing Area Curve</i> con el algoritmo de referencia del <i>NIST</i>	141
Capítulo 6. Conclusiones Y Líneas de Desarrollo Futuro		143
Referencias		147

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

El acabado superficial supone un vínculo crucial entre un componente, el proceso de fabricación con el que se ha generado y la funcionalidad que se espera del mismo (Whitehouse, 1994). Esta triple relación es la razón fundamental para la medida, caracterización y estudio de texturas superficiales.

Esta importancia se acentúa todavía más en el sector aeroespacial, donde la naturaleza de los componentes (sistemas hidráulicos de alta presión, inyectores de combustible etc...) hace necesarios altos niveles de calidad y muy precisas descripciones de las características de dichas piezas.

En el tradicional proceso de fabricación de alas y fuselajes a partir de aleaciones ligeras, por citar un ejemplo, los procesos de acabado superficial se utilizan tanto para conseguir unas superficies mejores desde el punto de vista aerodinámico como para controlar de forma precisa los radios de los bordes de ataque de estos componentes. Ambos procesos resultan en una reducción del riesgo de fallo por fatiga de los materiales, lo que en definitiva supone una reducción en la creación y propagación de grietas en los mismos.



Figura 1. Integración ala - fuselaje en la planta de Boeing en Seattle, proceso en el que el acabado superficial juega un papel fundamental en ambos componentes

Por otro lado, en la producción de motores a reacción, el efecto de un correcto acabado superficial de sus componentes se presenta principalmente en una mayor

eficiencia de trabajo de las partes móviles, tales como los sistemas de frenado o hidráulicos, así como en un mejor comportamiento aerodinámico, que se materializa fundamentalmente en los álabes de turbina.

Precisamente estos componentes, los álabes de turbina, junto a los álabes del compresor, son unos de los más susceptibles a las características del acabado superficial de un avión (Tennant, 1992), fundamentalmente por las ya citadas razones de interacción con el flujo de aire. Las partes significativas desde el punto de vista del acabado superficial de estos componentes son los bordes de ataque y de salida, puesto que es en estas secciones donde se controlan tanto los radios de fabricación como la anchura de las cuerdas de los álabes.

Las principales ventajas de un buen proceso de acabado superficial en un álabe son (Tennant, 1992):

- Mantenimiento en servicio más rápido y sencillo
- Acabado uniforme de partes cóncavas y convexas
- Reducción en tiempo y coste del posterior recubrimiento térmico (en álabes de turbina)
- Precisión en el acabado de bordes de ataque y de salida
- Mayor resistencia al fallo por fatiga y tensión superficial

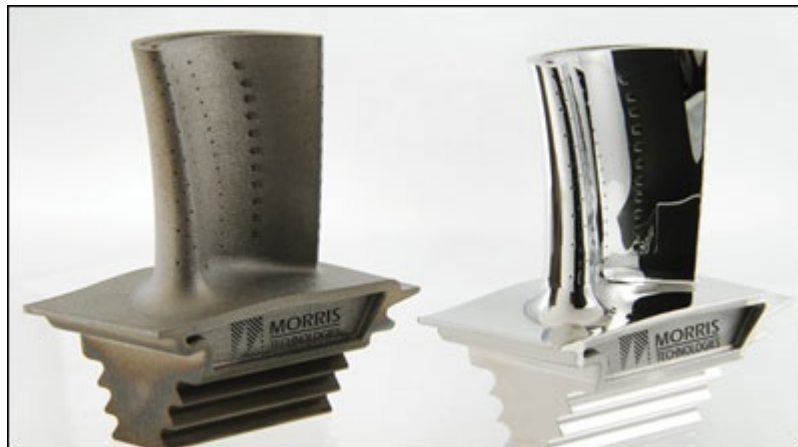


Figura 2. Álabes de turbina sinterizados por láser por la empresa EOS. Modernos procesos de fabricación como el DMLS [Direct Metal Laser-Sintering] (izquierda) son clave para la optimización del acabado superficial de estos componentes.

La importancia de un correcto acabado superficial presentada en los ejemplos anteriores puede extenderse a prácticamente la totalidad de los componentes primarios de una aeronave.

En definitiva, un acabado superficial de calidad en los componentes de un avión trae consigo importantes ventajas en el comportamiento de la aeronave como conjunto (Rösler, 2012):

- Incremento de la durabilidad de las piezas
- Intervalos de mantenimiento mayores
- Factores de seguridad mayores
- Reducción del peso manteniendo funcionalidad

Nótese que lo anterior engloba las tres máximas de la aeronáutica comercial a día de hoy, tanto para fabricantes como para aerolíneas: seguridad, peso y tiempo de vuelo.

Estandarización es también una palabra clave en el mundo del acabado superficial, puesto que éste forma parte de un proceso de producción, y la tendencia histórica ha sido estandarizar estos procesos, al menos desde el inicio de la producción en masa a mediados del siglo XIX.

En el contexto de los procesos de fabricación, concretamente del sector aeroespacial, dos organismos son responsables de la publicación de los estándares que son seguidos en todo el mundo: la Organización Internacional de Normalización (en inglés *International Organization for Standardization*, en adelante ISO) y la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (del inglés *American Society of Mechanical Engineers*, en adelante ASME).

La ISO (ISO, 2014) fue fundada tras la Segunda Guerra Mundial, en 1946, en Londres, y ha publicado desde entonces más de 19500 Estándares Internacionales. La ASME (ASME, 2014), pese a ser más antigua (fundada en 1880), acumula alrededor de 500 publicaciones.

Los estándares ISO, que son los que fundamentalmente se basa el presente trabajo, cubren prácticamente todos los aspectos relacionados con los procesos de fabricación y producción y con el mundo tecnológico en general.

Dentro de este amplio abanico, el presente texto se centra en la estandarización que la normativa ISO establece en cuanto a las herramientas (software) de referencia a utilizar durante la caracterización del acabado superficial de los

componentes de un sistema. Ejemplos de estos componentes pudieran ser los ya presentados anteriormente: alas, fuselaje, álabes etc... y ejemplo de sistema pudiera considerarse la aeronave en sí.

La necesidad del uso de herramientas de tratamiento de información y de análisis claramente definidas queda patente si se analiza en detalle el proceso requerido para garantizar un correcto acabado superficial. Este proceso puede dividirse en tres fases:

- Recogida de información: Medida de la rugosidad del componente bajo estudio.
- Caracterización del acabado superficial: Análisis y tratamiento de la información recogida.
- Procesos de aseguramiento de la calidad: Engloban las acciones a tomar requeridas para garantizar un correcto acabado superficial.

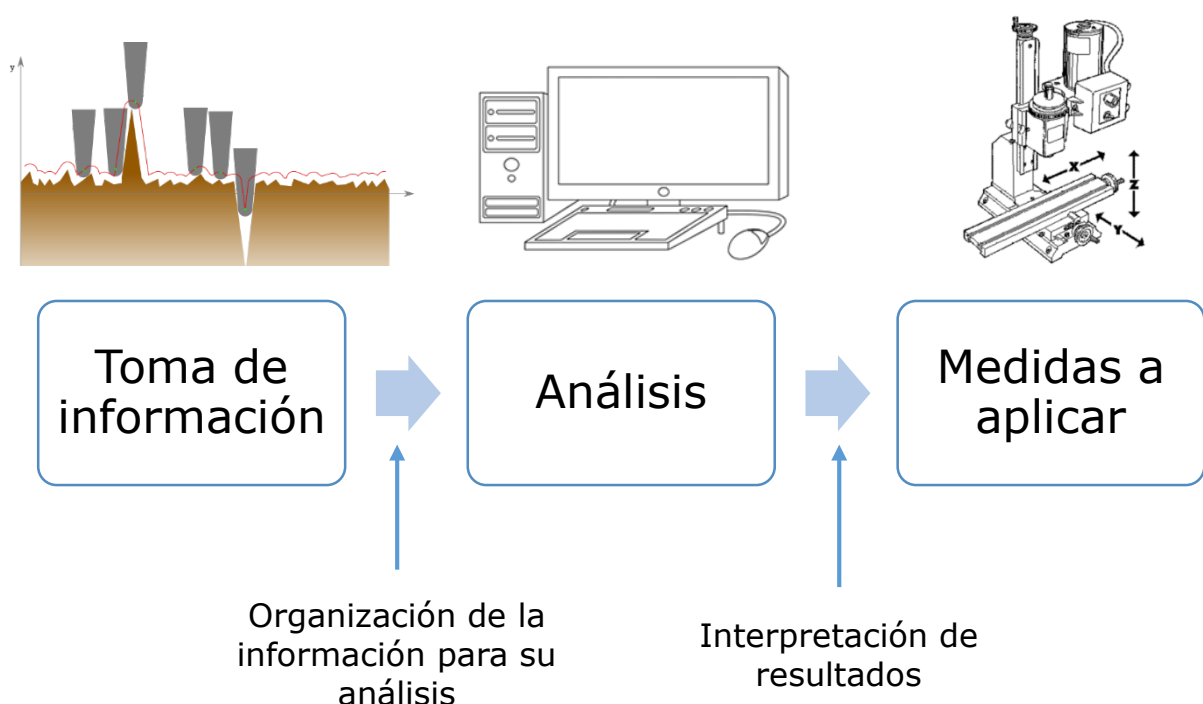


Figura 3. Esquema general del estudio del acabado superficial

La figura 3 resume el proceso de aseguramiento de calidad en los procesos de acabado superficial.

En el contexto de la industria de fabricación, las herramientas software de referencia conforman el bloque 2, *Análisis*, y su entrada, *Organización de la información para su análisis*, y se emplean principalmente para verificar los programas de los instrumentos de medida, y obtener así unos resultados estandarizados, y por tanto comprobables.

La medición del acabado superficial a través de parámetros está condicionada a los algoritmos de cálculo empleados en la determinación de dichos parámetros, que incluyen el filtrado. Esta circunstancia puede generar diferentes resultados de salida para una misma información de medida. Conscientes de este hecho y en la idea de validar el software de cálculo de cualquier desarrollador, ISO, a través de su norma 5436-2 propone un procedimiento de validación y contrastación de los resultados obtenidos entre diferentes programas de cálculo basado en la creación de patrones de software.

El presente trabajo se centra, en primer lugar, en el análisis de la forma en la que aplican esta Norma los principales organismos metrológicos (véase *Capítulo 3: Desarrollos de la norma ISO 5436-2*) así como en el tratamiento que se hace de la información (bloque *Análisis*). Se incluyen también nociones sobre la interpretación de los resultados obtenidos en éste análisis. Los procedimientos y herramientas a utilizar durante la toma de datos de una superficie queda fuera del alcance del texto, y se supondrá siempre que esta información es conocida de antemano.

En paralelo con el análisis anterior se llevará a cabo un desarrollo propio de aplicación de la Norma ISO 5436-2, *VisualSR2D*, que no solo se encargará de tratar y ordenar la información primitiva haciendo interpretación de la Norma (véase 4.3.2 *VisualSR2D .smd Generator*), sino que también incluirá múltiples herramientas de análisis de información. Esto es, una vez recogida y organizada la información de acuerdo a los estándares ISO, se aplican métodos numéricos para extraer información cuantificable y comparable de los datos iniciales.

La base teórica de estas herramientas de análisis, así como conceptos básicos sobre la interpretación de los resultados que producen, se presenta en el *Capítulo 5: Base Teórica de las Herramientas de Análisis de VisualSR2D*.

Finalmente, el último bloque se la figura 3 también queda fuera del alcance del presente trabajo, y estaría formado por todas aquellas actuaciones de corrección que fueran consideradas necesarias tras el estudio de los resultados provenientes del análisis, que estarían ligadas fundamentalmente con el trabajo directo sobre la pieza mediante herramientas especializadas.

Capítulo 2. LA NORMA ISO 5436-2

2.1 INTRODUCCIÓN

En el *Capítulo 1: Introducción* se ha introducido la Norma ISO 5436-2 como un estándar necesario para la validación y contrastación de los resultados obtenidos entre diferentes programas de cálculo en el contexto del acabado superficial.

A continuación se desarrolla de manera formal esta norma, cuyo entendimiento será fundamental para el estudio de los algoritmos de procesamiento de los principales organismos metrológicos, así como para el desarrollo de *VisualSR2D*, alternativa desarrollada en el presente trabajo a dichos algoritmos.

2.2 LA NORMA ISO 5436-2

Por Norma ISO 5436-2 se hará referencia a lo largo de este texto a norma europea EN ISO 5436-2 de diciembre de 2001, que a su vez adopta íntegramente la Norma Internacional ISO 5436-2:2001. El título de esta norma es:

Especificación geométrica de productos (GPS)

Calidad Superficial: Método del perfil; patrones de medición

Parte 2: Software patrón para la medición

La parte 1 de esta norma, **Medidas Materiales**, queda fuera por tanto del objeto de estudio del presente texto.

Esta norma ha sido elaborada por el comité técnico AEN/CTN 82 *Metrología y Calibración* cuya Secretaría desempeña AENOR, y fue aprobada a nivel europeo por CEN, Comité Europeo de Normalización, el 15 de diciembre de 2001.

Esta segunda parte de la Norma ISO 5436 está considerada como norma GPS (*Geometric Product Specification*) general (véase el Informe Técnico ISO/TR 14638), y afecta al eslabón 6 de la cadena de normas sobre rugosidad, ondulación y perfil primario.

Esta parte de la Norma ISO, junto con la Norma ISO 5436-1, introduce dos nuevos patrones de medida denominados: Tipo E, para la calibración del sistema de

coordenadas de perfil, y Tipo F, para la calibración del software. Esta segunda parte en estudio de la Norma ISO 5435 por tanto es relativa al programa de software patrón de la medición, y define los patrones de software Tipo F1 y F2 para la verificación de los programas (software) de los instrumentos de medición. Asimismo, define el formato del archivo del programa (software) patrón de Tipo F1 de medición para la calibración de instrumentos empleados en la medición de la calidad superficial, mediante el método del perfil, como se recoge en la Norma ISO 3274.

2.3 FORMATO DE ARCHIVOS PARA DATOS DE REFERENCIA DE TIPO F1

La extensión del archivo de este protocolo es *.smd*. Estos patrones son ficheros de datos informáticos que contienen una representación digital de una superficie o de un perfil en un medio adecuado de almacenamiento.

Los patrones de tipo F1 se emplean para verificar los programas (software), usándolos como datos de entrada en el software que quiere calibrarse o verificarse, y comparando los resultados de dicho software con los resultados certificados, que se recogen en la calibración del programa de referencia.

El protocolo para el calibre virtual se divide en cuatro secciones o registros distintos. Cada registro se compone de varias líneas de información y cada línea contiene varios campos en los que la información está codificada. El formato del fichero emplea el código ASCII de 7 bits.

Estas cuatro secciones o registros son:

- Registro 1 – Cabecera
- Registro 2 – Otra información (opcional y no obligatoria)
- Registro 3 – Datos
- Registro 4 – Suma de verificación (*checksum*)

Cada una de las líneas que componen cada registro está separada de la siguiente con un carácter ASCII de retorno de carro (<cr>) y otro de línea nueva (<lf>). Por si el lector no estuviera familiarizado con el código ASCII, estos caracteres no imprimibles, (<cr>) y (<lf>), son los que se generan de forma automática cuando se crea una nueva línea en un editor de texto corriente, como puede ser Notepad o Word.

Adicionalmente, cada registro termina con un carácter especial, (<ETX>), que corresponde al carácter (<ASCII 3>), y que indica precisamente final de registro. A la vista de la estructura presentada, se concluye que un fichero estandarizado *.smd* deberá incluir exactamente cuatro caracteres de fin de registro.

2.4 REGISTROS DEL FICHERO .SMD DE ACUERDO A LA NORMA

A continuación se detalla la información incluida en cada uno de los registros ya presentados en el apartado anterior, tal y como se recoge en la Norma ISO 5436-2.

2.4.1 Registro 1 – Cabecera

El primer registro contiene una cabecera fija que incluye la siguiente información:

- versión del formato de archivo del calibre virtual
- identificador del fichero
- tipo de elemento geométrico GPS, número y nombre del elemento geométrico almacenado – información del eje
- número de puntos que definen el perfil
- escala de los puntos definidos
- resolución de los puntos definidos

La primera línea del registro 1 contiene dos campos. Éstos son:

- *The_revision_number* (el número de versión), y
- *File_identifier* (identificador del fichero).

La tabla 1 muestra las opciones posibles válidas para dichos campos.

Tabla 1. Campos para la línea 1 del Registro 1

Nombre del campo	Opciones posibles/ejemplos	Comentarios
The_revision_number (Número de versión)	`ISO 5436 – 2000`	Cadena de caracteres ASCII
File_identifier (Identificador del fichero)	`XXXXXX`	Cadena de caracteres ASCII

La segunda línea del Registro 1 contiene tres campos. Éstos son:

- *Feature_type* (tipo del elemento geométrico),
- *Feature_number* (número del elemento geométrico)
- *Feature_name* (nombre del elemento geométrico).

La tabla 2 muestra las opciones válidas para dichos campos.

Tabla 2. Campos para la línea 2 del registro 1

Nombre del campo	Opciones posibles/ejemplos	Comentarios
Feature_type (Número de versión)	`PRF` `SUR`	Datos del perfil {es decir, (X,Z), (R,A), etc.} Datos de la superficie {es decir, (X,Y,Z), (R,A,Z), etc.}
Feature_number (Número del elemento geométrico)	0	Entero sin signo
Feature_name (Nombre del elemento geométrico)	`ISO000`	Cadena de caracteres ASCII

Cada una de las restantes líneas del Registro 1 contiene al menos seis campos. Éstos son:

- *Axis_name* (nombre del eje)
- *Axis_type* (tipo del eje)
- *Number_of_points* (número de puntos)
- *Units* (unidades)
- *Scale_factor* (factor de escala)
- *Axis_data_type* (tipo de los datos del eje)

Un séptimo campo contiene el valor incremental, que se añade sólo en el caso de que el tipo de eje sea incremental. En el caso de tipo de eje incremental se suponen adicionalmente puntos equiespaciados.

A cada eje del calibre virtual le corresponde una línea asociada al mismo. Así, para un perfil existirán dos líneas una para el eje X y otra para el eje Z.

La tabla 3 muestra las posibles opciones que se pueden tener en dichos campos.

Tabla 3. Campos para el resto de líneas del registro 1

Nombre del campo	Opciones posibles/ejemplos	Comentarios
Axis_name (Nombre del eje)	'CX' 'CY' 'CZ' 'PR' 'PA'	Eje X, en coordenadas cartesianas Eje Y, en coordenadas cartesianas Eje Z, en coordenadas cartesianas Radio, en coordenadas polares Ángulo, en coordenadas polares
Axis_type (Tipo del eje)	'A' 'I' 'R'	Datos absolutos ^a Datos incrementales ^b Datos relativos ^c
Number_of_points (Número de puntos)	4003	Número de puntos de datos (Entero largo sin signo)
Units (Unidades)	`m` `mm` `um` `nm` `rad` `deg`	Metros Milímetros Micrómetros Nanómetros Radianes Grados
Scale_factor (Factor de escala)	1.0e0	Escala de las unidades indicadas (coma flotante en doble precisión)
Axis_data_type (Tipo de datos del eje)	`I` `L` `F` `D`	Entero Entero largo Coma flotante en simple precisión Coma flotante en doble precisión
Incremental_value ^d (Valor incremental)	1e-3	Valor del incremento (coma flotante en doble precisión)
^a Datos absolutos: cada valor de los datos es la distancia sobre el eje, desde el origen del mismo. ^b Datos incrementales: se supone que los datos están equiespaciados sobre el eje: solo se necesita un único incremento. ^c Datos relativos: cada valor de los datos es la distancia sobre el eje con respecto al punto precedente. El primer valor es la distancia desde el origen del eje. ^d Solo para el tipo de eje I.		

En la figura 4 se muestra un ejemplo del Registro 1 completo de un perfil real, en el que se han hecho explícitos todos los caracteres ASCII ya comentados en 2.3 *Formato de Archivos para Datos de Referencia de Tipo F1*. Nótese la indicación de final de registro, (<ETX>), equivalente a (<ASCII 3>), al final del registro.

```
ISO 5436 - 1999 NUL EDM NUL CR LF
PRF NUL 2 ISO5436 NUL CR LF
CX NUL I NUL 22401 um NUL 1.0e0 DNUL 0.25 CR LF
CZ NUL A NUL 22401 um NUL 1.0e0 DNUL CR LF
ETX CR LF
```

Figura 4. Ejemplo del registro 1

2.4.2 Registro 2 – Otra información (opcional y no obligatoria)

El segundo registro puede contener otra información. Ésta debe comenzar por una palabra clave. La lista de ejemplos que sigue (véase la tabla 4) no es exhaustiva y pueden especificarse y emplearse nuevas palabras clave.

Si el Registro 2 no se emplea, debe existir una marca de fin de registro (<ASCII 3>) inmediatamente después del final del Registro 1.

Tabla 4. Ejemplos de palabras clave para el registro 2

Nombre del campo	Tipo	Comentarios
DATE (FECHA)	Cadena de caracteres ASCII	Dato de la medición
TIME (HORA)	Cadena de caracteres ASCII	Hora de la medición
CREATED_BY (CREADO POR)	Cadena de caracteres ASCII	Nombre de la persona encargada de efectuar la medición
INSTRUMENT_ID (IDENTIFICADOR DEL INSTRUMENTO)	Cadena de caracteres ASCII	Identificación del instrumento de medición (fabricante y modelo)
INSTRUMENT_SERIAL (NÚMERO DE SERIE DEL INSTRUMENTO)	Cadena de caracteres ASCII	Número de serie del instrumento de medición
LAST_ADJUSTEMENT (ÚLTIMO AJUSTE)	Cadena de caracteres ASCII	Fecha y hora del último ajuste
PROBING_SYSTEM (SISTEMA DE PALPADO)	Véase la tabla 5	Detalles relativos al sistema de palpado empleado en la medición
COMMENT (COMENTARIO)	Cadena de caracteres ASCII delimitada por "/" y "/"	Comentarios generales
OFFSET _mm (error de cero)	Coma en doble precisión	Error de cero, a partir del origen para el inicio de la medida, en mm
SPEED (VELOCIDAD)	Coma flotante en simple precisión	Velocidad de desplazamiento, en mm/s
PROFILE_FILTER (FILTRO DEL PERFIL)	Véase la tabla 6	-
PARAMETER_VALUE (VALOR DEL PARÁMETRO)	Véase la tabla 7	-

En la figura 5 se muestra un ejemplo real de información opcional añadida a un fichero .smd, en la que se utiliza un modo de visualización con todos los caracteres ASCII explícitos.

La información del Registro 2 es opcional y no obligatoria. Aunque pueda ser empleada por los ordenadores, los datos deben poder emplearse sin la información precedente del Registro 2.

```
DATE · 6 · January · 2009 · NUL · CR · LF
TIME · 9 : 35 · NUL · CR · LF
CREATED_BY · NIST · Virtual · Surface · Calibration · Software · NUL · CR · LF
ETX · CR · LF
```

Figura 5. Ejemplo del registro 2

Tabla 5. Campos de PROBING_SYSTEM (sistema de palpado) del registro 2

Nombre del campo	Tipo	Comentarios
Keyword (palabra clave)	PROBING_SYSTEM	
Probing_system_identification (identificación del sistema de palpado)	Cadena de caracteres ASCII	Identificación del tipo de sistema de palpado
Probing_system_type (tipo de sistema de palpado)	Por contacto Sin contacto	Sistema de palpado que necesita un contacto físico Sistema de palpado que no necesita contacto
Tip_radius_value (Valor del radio de la punta del palpador)	Coma flotante en doble precisión	Valor del radio
Units (Unidades)	`m` `mm` `um` `nm`	Metros Milímetros Micrómetros Nanómetros
Tip_angle (Ángulo de la punta del palpador)	Coma flotante en doble precisión	Ángulo de la porción esférica del palpador en grados

Tabla 6. Campos de la opción PROFILE_FILTER (filtro) del registro 2

Nombre del campo	Tipo	Comentarios
Keyword (palabra clave)	FILTER	
Filter_type (Tipo de filtro)	`Gaussiano`	Filtro Gaussiano según la Norma ISO 11562
Ls_cutoff_value (Valor de la longitud de onda de corte Ls)	Ls0.25e+1	"Ls" y valor en coma flotante en doble precisión Valor de λ_s en μm
Lc_cutoff_value (Valor de la longitud de onda de corte Lc)	Lc0.8e+0	"Lc" y valor en coma flotante en doble precisión Valor de λ_c en μm
Lf_cutoff_value (Valor de la longitud de onda de corte Lf)	Lf8.0e+0	"Lf" y valor en coma flotante en doble precisión Valor de λ_f en μm

La tabla 6 resulta de especial importancia, pues se adelanta ya que el software creado en este Trabajo de Fin de Grado, *VisualSR2D*, hace un uso intensivo de este campo por su idoneidad para transferir información del perfil que no se hace explícita en el Registro 1, pero, sin embargo, afecta en gran medida a la caracterización del perfil a través del cálculo de sus parámetros asociados, como se explicará en capítulos posteriores.

Tabla 7. Campos para la opción *PARAMETER_VALUE* (valor del parámetro) del registro 2

Nombre del campo	Tipo	Comentarios
Keyword (palabra clave)	PARAMETER_VALUE	
Parameter_name (Nombre del parámetro)	Cadena de caracteres ASCII	Ejemplo "Wq"
Parameter_value (Valor del parámetro)	Coma flotante en doble precisión	Valor del parámetro
Units (Unidades)	`m` `mm` `um` `nm`	Metros Milímetros Micrómetros Nanómetros
Uncertainty (Incertidumbre)	Coma flotante en doble precisión	Incertidumbre calculada según la GUM

2.4.3 Registro 3 – Datos

El tercer registro contiene los datos. Cada eje definido en el Registro 1 es decir, un eje no incremental, requerirá datos.

Los datos contenidos en el Registro 3 están escritos en bloques, según el orden en que los ejes están definidos en el Registro 1. Cada línea del Registro 3 hace referencia a un único valor. Dichas líneas contienen un campo:

- *Data_value* (valor del dato).

La multiplicación del valor del dato por el factor de escala indicado en el Registro 1 proporciona el valor en las unidades especificadas en el Registro 1.

La tabla 8 proporciona las opciones posibles para cumplimentar dicho campo.

Como ejemplo de Registro 3, véase la figura 6, en la que de nuevo se presenta una vista de un perfil real. No obstante, en este caso se ha acotado el número de puntos, debido a que en un caso general un perfil presente decenas de miles de ellos.

Tabla 8. Campo para el registro 3

Nombre del campo	Tipo	Comentarios
Data_value (valor del dato)	Entero Entero largo Coma flotante en simple precisión Coma flotante en doble precisión	El valor del dato está en el formato definido en el registro 1: `Axis_data_type` (Tipo de dato del eje)

```

-0.552060869716514CRLF
-0.526274706178733CRLF
-0.513381542640952CRLF
-0.500488379103172CRLF
-0.487595215565391CRLF
-0.47470205202761CRLF
-0.448915888489829CRLF
-0.423129724952048CRLF
-0.410236561414267CRLF
-0.384450397876486CRLF
-0.358664234338706CRLF
-0.332878070800925CRLF
-0.307091907263144CRLF
-0.268412743725363CRLF
-0.242626580187582CRLF
-0.203947416649801CRLF
-0.16526825311202CRLF
-0.12658908957424CRLF
-0.100802926036459CRLF
-0.0750167624986778CRLF
-0.049230598960897CRLF
-0.0363374354231161CRLF
ETXCRLF

```

Figura 6. Ejemplo del registro 3

2.4.4 Registro 4 – Suma de verificación: *Checksum*

Este registro contiene una suma para la verificación (*checksum*) de los datos contenidos en los registros 1, 2 y 3. Estas sumas se emplean para verificar la precisión de los datos.

La suma para la verificación se obtiene a partir de la adición de todos los valores individuales de los bytes (incluyendo los caracteres <cr>, la marca de final de registro <lf>, etc.) sobre los registros 1, 2 y 3 de manera que se obtenga un entero en formato largo, sin signo, y de módulo 65 535.

En cuanto a los valores individuales de los bytes, es necesario aclarar que el código ASCII puede dividirse en caracteres imprimibles y caracteres no imprimibles. Los primeros, así como sus valores de bytes individuales, se muestran en la tabla 9. Por otro lado, existen también caracteres ASCII no imprimibles, entre los que, para el efecto de aplicación de esta Norma, destacan los caracteres <cr>, la marca de final de registro <lf>, el indicador de final de sección <ETX> y el indicador de final de fichero <sub>. La tabla 10 recoge los valores individuales de los bytes de este segundo tipo de caracteres ASCII.

En MATLAB, software utilizado para la creación de *VisualSR2D* tal y como se explicará en el 4.2 *Implementación y Distribución*, existen varias formas de convertir de forma rápida una cadena de caracteres ASCII en los valores de sus bytes. Por citar algunos ejemplos, tanto las funciones *double()* como *uint8()* o *int()*

proporcionan los resultados buscados, si bien la forma más directa, y recomendada en este texto, es utilizar siempre la primera alternativa, función *double()*.

Tabla 9. Valores individuales de los bytes de los principales caracteres ASCII imprimibles

Dec	Representación	Dec	Representación	Dec	Representación
32	espacio ()	64	@	96	`
33	!	65	A	97	a
34	"	66	B	98	b
35	#	67	C	99	c
36	\$	68	D	100	d
37	%	69	E	101	e
38	&	70	F	102	f
39	'	71	G	103	g
40	(72	H	104	h
41)	73	I	105	i
42	*	74	J	106	j
43	+	75	K	107	k
44	,	76	L	108	l
45	-	77	M	109	m
46	.	78	N	110	n
47	/	79	O	111	o
48	0	80	P	112	p
49	1	81	Q	113	q
50	2	82	R	114	r
51	3	83	S	115	s

Referente a la operación módulo 65535, esta operación devuelve el resto de dividir la suma de los valores individuales de los bytes entre 65535. A efectos de cálculo computacional, si $M = \text{mod}(X, 65535)$ donde M sería el resultado de efectuar la operación de módulo 65535 entre en la suma de los valores de los bytes, X , programas como MATLAB efectúan la siguiente operación:

$$M = X - n.*Y$$

Donde n es el mayor entero que resulta de X/Y .

Tabla 10. Valores individuales de los bytes de los principales caracteres ASCII no imprimibles

Decimal	Abreviatura	Nombre/Significado	Decimal	Abreviatura	Nombre/Significado
0	NUL	Carácter Nulo	17	DC1	Dispositivo de control 1 oft. XON
1	SOH	Inicio de Encabezado	18	DC2	Dispositivo de control 2
2	STX	Inicio de Texto	19	DC3	Dispositivo de control 3 oft. XOFF
3	ETX	Fin de Texto	20	DC4	Dispositivo de control 4
4	EOT	Fin de Transmisión	21	NAK	Confirmación negativa
5	ENQ	Consulta	22	SYN	Síncrono en espera
6	ACK	Acuse de recibo	23	ETB	Fin de Transmisión
7	BEL	Timbre	24	CAN	Cancelar
8	BS	Retroceso	25	EM	Finalización del Medio
9	HT	Tabulación horizontal	26	SUB	Substituto
10	LF	Salto de línea	27	ESC	Escape
11	VT	Tabulación Vertical	28	FS	Separador de fichero
12	FF	De avance	29	GS	Separador de grupo
13	CR	Retorno de carro	30	RS	Separador de registro
14	SO	Mayúsculas fuera	31	US	Separador de unidad
15	SI	En mayúsculas	127	DEL	Eliminar
16	DLE	Enlace de datos			

Finalmente, la figura 7 muestra un ejemplo real del Registro 4 – *checksum* de un fichero estandarizado *.smd*. Nótese que tal y como se comentó en 2.3 *Formato de Archivos para Datos de Referencia de Tipo F1*, se incluye el carácter <SUB> que indica final del fichero.

```
48047CRLE
ETXCRLE
SUBCRLE
```

Figura 7. Ejemplo de registro 4 en un fichero real

2.5 COMENTARIOS FINALES SOBRE LA NORMA ISO 5436

Los estándares de medición a través de software aquí descritos son usados por desarrolladores para comprobar las funcionalidades de sus programas, además de como ayuda para la localización de errores y verificación de resultados de sus algoritmos (National Physical Laboratory, 2014).

Estos estándares también son muy utilizados por usuarios, en el contexto de la industria de fabricación, como verificación de la exactitud de las técnicas de análisis que utiliza el software embebido en sus herramientas metrológicas.

Aunque pudiera pensarse que para verificar todos estos programas también existe la posibilidad de utilizar materiales o artefactos físicos, la realidad es que en este caso estaría evaluándose el proceso de medición completo, y no solamente el software bajo desarrollo, lo que introduciría incertidumbres relativamente grandes comparadas con estas que se obtienen de la comprobación a partir de los estándares software.

La Norma ISO 5436 establece estándares de medición Tipo F1, que son los ficheros con los datos de referencia, representaciones digitales de perfiles, y Tipo F2, que constituyen un software de referencia.

Los estándares de medición Tipo F1 son utilizados para comprobar la funcionalidad de software bajo desarrollo, utilizándolos como entrada en dicho programa, y comparando los resultados con aquellos provenientes de otros programas certificados en el cumplimiento de los estándares de medida de este tipo de archivos.

Por su parte, los estándares de medida Tipo F2 son utilizados para comparar los resultados obtenidos por el software bajo revisión, normalmente programas incluidos en instrumentos metrológicos, y un software de referencia. Para ello, en ambos programas es cargada una misma entrada. Los errores cometidos por el software en desarrollo pueden estimarse a partir de una comparación de resultados con el software certificado.

La conclusión es que la Norma ISO 5436-2 resulta indispensable para el tratamiento de ficheros mediante herramientas de software.

Desde el punto de vista de creación de un programa, tal como *VisualSR2D*, la única forma de dotar de cierta *inteligencia* y capacidad de análisis a un software es indicarle dónde recoger la información, qué debe hacer con ella y qué debe hacer si no encuentra dicha información.

La existencia de campos con nombres identificados y bien definidos es clave para poder acceder a esta información de forma ordenada mediante técnicas de reconocimiento de texto (conocidas como *parsing*). Así, por ejemplo, teniendo clara la estructura del Registro – 1 y siendo aplicada ésta a un fichero, es posible programar una aplicación que detecte campo a campo etiquetas de información

(*The_Revision_Number*, *File_Identifier* etc...) y almacene los valores correspondientes a cada una de ellas.

También de esta forma es posible tratar con cierta seguridad los casos en los que realmente hay información que no ha sido proporcionada. Por ejemplo, el Registro – 2, tal y como se ha explicado, es de contenido completamente variable. Poder localizar de forma rápida este registro en el fichero *.smd* gracias a los identificadores de final de sección <ETX> permite un conteo rápido de las líneas de información y las etiquetas de las mismas, lo que hace que sea relativamente rápido conocer que campos opcionales tiene el fichero y cuáles no.

Finalmente, y haciendo referencia de nuevo al Registro – 2, hay que destacar que aunque la norma fija multitud de nombres de campos de referencia, deja la puerta abierta a incluir cualquier etiqueta adicional definida por el creador del fichero. Si bien esto puede resultar útil de cara a una interpretación humana, se considera que está completamente fuera del alcance de este trabajo la interpretación de campos *libres*, esto es, campos opcionales con etiquetas personalizadas por cada usuario, pues este análisis requiere técnicas de *parsing* infinitamente más complejas que las necesarias para tratar campos estandarizados, por lo que resultan difícilmente aplicables a herramientas basadas en software. De hecho, ninguna de las referencias de aplicación de la Norma ISO 5436 analizadas durante este trabajo, que serán descritas en el próximo capítulo, se acerca siquiera a este planteamiento de reconocimiento avanzado de texto.

Capítulo 3. DESARROLLOS DE LA NORMA ISO 5436-2

3.1 INTRODUCCIÓN

Las referencias usadas durante la elaboración de este texto y del software de aplicación de la Norma ISO 5436-2, *VisualSR2D*, que será descrito en el próximo capítulo, son fundamentalmente tres.

En todos los casos se trata se programas desarrollados por organismos oficiales, en los que el software de aplicación de la norma aquí tratada es sólo una pequeña fracción de sus actividades.

Estos organismos son:

- *National Institute of Standards and Technology*ⁱ: Fundada en 1901 y siendo actualmente parte del Departamento de Comercio de los Estados Unidos, el *National Institute of Standards and Technology* (en adelante *NIST*) es uno de los más antiguos laboratorios científicos de Norteamérica.

Con sede en Gaithersburgo, Maryland, la misión de este instituto es promover la innovación y la competencia industrial en Estados Unidos mediante avances en metrología, normas y tecnología de forma que mejoren la estabilidad económica y la calidad de vida.

Como parte de esta misión, los científicos e ingenieros del *NIST* continuamente refinan sus procesos y técnicas, entre las que se incluyen las metrológicas, desarrollando así métodos precisos y evolucionando constantemente en el campo de la manufacturación. También están directamente involucrados en el desarrollo y pruebas de normas hechos por el sector privado y agencias de gobierno.

Sus actividades van, por citar algunos ejemplos, desde estudios nanotecnológicos hasta la creación de redes de comunicación mundiales o estudio de modernos rascacielos.

Para dar una idea del tamaño de esta institución, es interesante comentar que el *NIST* tuvo un presupuesto en el año fiscal 2006 de aproximadamente 930 millones de dólares, y empleó a cerca de 2.800 científicos, ingenieros, técnicos y personal de administración y soporte.

ⁱ <http://www.NIST.gov/>

- *National Physical Laboratory*ⁱⁱ: El *National Physical Laboratory* (en adelante *NPL*), es el laboratorio estándar de técnicas metrológicas del Reino Unido, y es también la mayor organización de física aplicada de Inglaterra.

Fundado en 1900 y con sede actual en Londres, la misión de esta institución es desarrollar y mantener los estándares de medición ingleses.

Hoy en día, además de proporcionar recursos científicos para el *National Measurement System* (Sistema Nacional de Medida), financiado por el *Department for Business, Innovation and Skills* (Departamento de Negocios, Innovación y Habilidades), el *NPL* ofrece también una amplia gama de servicios comerciales, tales como la aplicación de dichos recursos científicos a problemas de medición industrial, o gestionar la llamada Hora del *NPL* (*Time from NPL*), señal de radio emitida por esta misma organización que sirve como referencia temporal para todo el Reino Unido.

Adicionalmente, el *NPL* colabora también en redes profesionales para dar soporte a equipos de ingenieros y científicos cuyas labores se enmarcan en sus áreas de desarrollo.

- *Physikalisch-Technische Bundesanstalt*ⁱⁱⁱ: El *Physikalisch-Technische Bundesanstalt* (en adelante *PTB*), con sedes en Berlín y en Braunschweig, es el instituto nacional de metrología de la República Federal Alemana, y la más alta autoridad alemana en los campos tanto de la metrología como de la seguridad en la ingeniería. De las tres referencias comentadas, esta es la que más centrada está en el estudio de medidas.

Fundado en 1887, tiene como objetivos el desarrollo de la Metrología para las ciencias, la técnica y la sociedad. Además, de forma similar al *NPL*, es responsable de controlar y difundir la hora legal no solo del país, sino también globalmente de la zona horaria UTC, siendo encargado para ello de cuatro relojes atómicos.

Adicionalmente, el *PTB* es responsable de la certificación de las máquinas de votación para las elecciones federales y europeas de Alemania, así como de parte del desarrollo armamentístico alemán.

En lo que sigue se analiza como cada una de estas instituciones hacen aplicación de la Norma ISO 5436-2 para el tratamiento estandarizado de superficies, así como las posibilidades de los algoritmos y software que crean para tal efecto.

ⁱⁱ <http://www.npl.co.uk/>

ⁱⁱⁱ <http://www.ptb.de/>

3.2 ALGORITMO DEL NIST

El *NIST* hace aplicación de la Norma ISO 5436 en el llamado "*Internet based Surface Metrology Algorithm Testing System*", que puede encontrarse en <http://physics.NIST.gov/VSC/jsp/index.jsp>.

A nivel organizativo, ésta herramienta se encuentra dentro del *Surface and Nanostructure Metrology Group*, perteneciente a la *Semiconductor and Dimensional Metrology Division*.

De acuerdo a la descripción que el *NIST* ofrece de su sistema una simple conexión a internet y un navegador hace posible acceder a su algoritmo numérico, que permite tanto realizar análisis de acabados superficiales como descargar datos de referencia con parámetros ya calculados, con la finalidad de usarse como comparación en el desarrollo de otros sistemas.

El sistema del *NIST* puede dividirse en cuatro secciones fundamentales:

- Herramientas de análisis 2D
- Base de datos de perfiles bidimensionales
- Herramientas de análisis 3D
- Base de datos de superficies tridimensionales

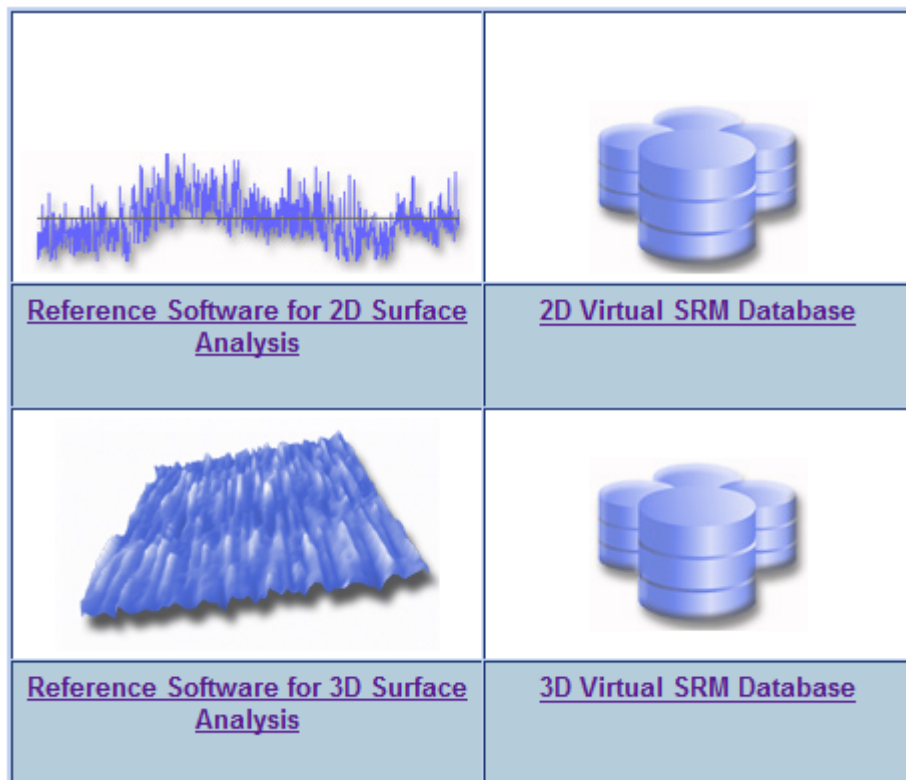


Figura 8. Distintos módulos del sistema en análisis del NIST

En lo que sigue, no obstante, se detallan las dos primeras secciones, correspondientes al caso bidimensional, pues este es el objeto del presente texto y del software *VisualSR2D*, que será descrito en el siguiente capítulo.

3.2.1 Base de datos 2D del *NIST*

El *NIST* ofrece más de 20 perfiles en el formato estandarizado *.smd* descrito en 2.3 *Formato de Archivos para Datos de Referencia de Tipo F1*. Estos perfiles incluyen además información sobre el valor de los principales parámetros del perfil de acuerdo a su algoritmo de cálculo, que serán analizados en capítulos posteriores (véase 5.1 *Parametrización*).

Muchos de estos perfiles han sido obtenidos del *NPL*^{iv}.

Es posible descargar cada uno de estos perfiles a través de esta misma web, que ofrece un fichero *.zip* con los datos del perfil en múltiples variantes:

- *.smd*: tal y como se describe en la Norma ISO 5436-2. Es el que será tratado a lo largo de este texto.
- *.xml*
- *.sdf*

3.2.2 Herramientas de análisis 2D del *NIST*

Una vez cargado un fichero *.smd* o *.sdf* válido en su sistema de subida, el *NIST* permite acceder a una serie de herramientas de análisis 2D.

Se entiende por fichero válido aquel en el que toda la información está estructurada de acuerdo a lo descrito en la Norma ISO 5436-2, que además sea coherente con su *checksum* (suma de verificación) y que tenga unos valores determinados en ciertos campos, tales como *The_Revision_Number*, como se explicará más adelante. Si el sistema detecta un fichero, que por cualquiera de las razones anteriores, no es válido, simplemente devolverá al usuario a la página principal. Desde este punto de vista, esto podría considerarse una desventaja del algoritmo del *NIST*, pues en ningún momento informa de cuál ha sido el problema detectado y, por tanto, de cuales pudieran ser las medidas a tomar en caso de no ser aceptado un archivo externo por su algoritmo, siendo además algunas de las razones de rechazo de un fichero arbitrarias en cierta medida.

Una vez cargado un fichero válido, las herramientas de análisis a las que se puede acceder son las siguientes:

^{iv} <http://physics.NIST.gov/VSC/jsp/News.jsp>

- *Curvature Removal* (Eliminación de curvatura): Permite, mediante técnicas de interpolación polinómica, eliminar curvatura de aquellos perfiles que la presenten. Este módulo no es considerado de interés para el presente trabajo y por tanto no será analizado en detalle.

Adicionalmente, una importante característica de este módulo, la función *Circular Fit* (Ajuste Circular), se encuentra en fase de pruebas en este algoritmo^v, luego su utilización como fuente de referencia pudiera dar lugar a errores.

- *Filter/Surface Parameters* (Filtrado/Parámetros de acabado superficial)
- *Power Spectral Density, PSD* (Densidad Espectral de Potencia).
- *Correlation* (Correlación).
- *Bearing Area Curve, BAC*. Conocido en la literatura española como Curva de la Tasa de Longitud Portante.

3.2.2.1 Filtrado/Parámetros de acabado superficial

El *NIST* utiliza un mismo módulo para describir los principales parámetros que caracterizan un acabado superficial, que serán tratados en 5.1 *Parametrización* y las técnicas de filtrado, que serán estudiadas en profundidad en 5.4 *Filtro Gaussiano* y 5.5 *Filtro 2RC* respectivamente.

Esta alternativa resulta ciertamente apropiada, puesto es tras el filtrado de un perfil cuando se definen las llamadas longitudes básicas, que son tomadas como referencia para el cálculo de parámetros.

Adicionalmente, tal y como se explicará en las secciones descritas, definida una longitud de onda de corte λ_c quedan descritos tanto un perfil de rugosidad como uno de ondulación. Con el enfoque que el *NIST* hace de este módulo, ambos perfiles son calculados de forma simultánea.

Como desventaja del este módulo, puede decirse que no está dirigido a la exportación del perfil, sino que está todo pensado para realizar análisis única y exclusivamente con el algoritmo ofrecen desde el *NIST*. Así, si por ejemplo decide exportarse un perfil filtrado, el correspondiente archivo *.smd* resultante no incluirá información sobre el tipo de filtro utilizado, lo que, en definitiva, hace complicada su interpretación por parte de terceras herramientas de análisis. Recuérdese que tal y como se vio en 2.4.2 *Registro 2 – Otra información (opcional y no obligatoria)*,

^v <http://physics.NIST.gov/VSC/jsp/CurvatureRemoval.jsp?state=0>

la Norma ISO 5436 sí que ofrecía un campo opcional precisamente para detallar el filtrado al que han sido sometidos los perfiles contenidos en un fichero *.smd*.

Filter

☒ **Gaussian**

Method **Fast Gaussian** ▼

Use Gaussian Window

☐ ☒

☐ **2RC**

Method **Recursive** ▼

Cutoff Setting

Long Cutoff (Lc) **0.08** ▼ mm

☐ Short Cutoff (Ls) **2.5** ▼ μm

Calculate

Surface Parameters

Calculation is based on:

☒ the evaluation length (ASME B46)

☐ all sampling length(s) (ISO 4287)

☒ Ra ☒ Rq ☐ Rsk

☒ Rku ☒ Rdq ☐ Rz

☐ Rp ☒ Rv ☐ Rt

☐ Sm*

☐ Rc

Height Discrimination **5.0** % Rz

Spacing Discrimination **1.0** % sampling length

☐ Calculate Uncertainty

Uz **1.0** % Pq

Ux **2.0** % spacing

Calculate

Figura 9. Menús de filtrado y análisis paramétrico del NIST

3.2.2.2 Densidad Espectral de Potencia

Las bases teóricas de la Densidad Espectral de Potencia serán tratadas en *5.8 Densidad Espectral de Potencia*.

El *NIST* ofrece tres métodos de cálculo distintos, la posibilidad de tomar como base de cálculo el perfil primario o uno de los filtrados (en el caso de haber aplicado un filtro) y opción a aplicar cuatro ventanas matemáticas.

Estos métodos son:

- *Mixed Radix FFT*
- *FFT*

Power Spectral Density

☐ Total Profile

☒ Waviness Profile

☐ Roughness Profile

Method **Mixed Radix FFT** ▼

Windows:

☐ Rectangular window

☐ Hann window

☐ Hamming window

☐ Blackman window

Calculate

Figura 10. Menú PSD del NIST

- *FFT Zero Padding*

Donde *FFT* significa Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*).

3.2.2.3 Correlación

Este módulo analiza la repetitividad de un perfil comparándolo consigo mismo, y será tratado en detalle en *5.7 Autocovarianza y Autocorrelación*. Adicionalmente el *NIST* permite al usuario cargar un segundo perfil de forma que, en lugar de compararse consigo mismo, este primer perfil pueda compararse con un segundo.

El algoritmo ofrece además dos métodos de cálculo:

- En el dominio espacial
- En el dominio de la frecuencia

The screenshot displays the NIST Correlation Module interface, which is organized into three main sections:

- Auto-Correlation:** This section includes a radio button for "Total Profile", a dropdown menu for "Calculation based on" set to "Spatial Domain", a text input for "Lag Length" followed by "mm", and a "Calculate" button.
- Cross-Correlation:** This section includes links for "Profile 1" and "Profile 2", a radio button for "Total Profile", an "Examinar..." button with the text "No se ha seleccionado ningún archivo.", a dropdown menu for "Calculation based on" set to "Spatial Domain", a text input for "Lag Length" followed by "mm", and a "Calculate" button.
- Analysis Report in Acrobat PDF:** This section includes a "Download Report" button, a "View Report" button, and an Adobe Acrobat Reader logo at the bottom.

Figura 11. Módulo de Correlación del NIST

3.2.2.4 Bearing Area Curve (BAC)

Como ya se ha indicado esta función también es conocida como Curva de la Tasa de Longitud Portante o Curva de Abbott – Firestone, y es una alternativa para la caracterización de perfiles a los parámetros tradicionales. La base matemática de esta función será tratada en 5.9 *Curva de Abbott – Firestone*.

Este es con diferencia el módulo más sencillo, al menos de cara a parámetros de entrada, que ofrece el *NIST*, siendo necesario rellenar un único campo, número de *bins* (número de celdas equiespaciadas en las que se divide el eje Z del perfil bajo estudio).

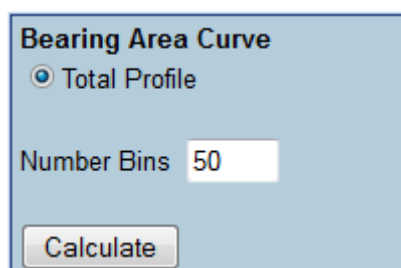


Figura 12. Interfaz de usuario del módulo BAC del *NIST*

3.2.3 Comentarios acerca del algoritmo del *NIST*

La aplicación web que proporciona el *NIST* es sin duda una magnífica herramienta para el estudio de acabados superficiales, en la que la interpretación de la Norma ISO 5436, que en este caso únicamente se hace evidente en el paso inicial de carga de un fichero *.smd*, se junta con las técnicas de análisis más habituales para superficies.

Estas técnicas también siguen estándares, tanto ISO como ASME (ASME, 2014). Así por ejemplo, para el filtrado y definición de parámetros, el algoritmo del *NIST* sigue los estándares ISO 4287, ISO 4288 y ASME-B46.1, dependiendo del fichero en consideración.

El hecho de que el algoritmo esté embebido en una interfaz gráfica disponible en la web posibilita una óptima distribución, de forma cualquier usuario tiene acceso directo a las posibilidades que este sistema ofrece.

No obstante, la alternativa del *NIST* también plantea inconvenientes. Por un lado, la aplicación que hace de la Norma ISO 5436 es completamente rígida. Por ejemplo, si quiere analizarse un archivo *.smd* con su algoritmo, el campo *The_Revision_Number* descrito en 2.4.1 *Registro 1 – Cabecera* debe ser obligatoriamente como sigue:

ISO 5436 – 1999

Cuando, de hecho, esta norma ya ha sufrido posteriores revisiones, como puede fácilmente deducirse de que la norma analizada en el capítulo anterior sea una versión más reciente del mismo estándar.

Una justificación de esta conclusión puede encontrarse en la documentación digital adjunta a este Trabajo de Fin de Grado, en el directorio *Material adicional/The_Revision_Number* en *NIST*.

Esto último puede extrapolarse a la estructura general del fichero *.smd*. Cualquier cambio menor en esta estructura o error el *checksum* conlleva al rechazo directo del archivo por parte del algoritmo del *NIST* sin dar explicación del error producido.

Todo lo anterior resulta en que, pese a la facilidad de acceso a la plataforma web que ofrece el *NIST*, un usuario no experimentado puede tardar varios días desde que dispone de un vector con los datos de su perfil a analizar hasta que realmente consigue utilizar las herramientas de análisis del *NIST*, puesto que el proceso de construir el fichero *.smd* de acuerdo a la norma, la interpretación de los distintos campos y el cálculo del *checksum* pueden no resultar fáciles si no se tiene experiencia trabajando con ellos.

En segundo lugar, también es destacable que el algoritmo del *NIST* no parece estar recibiendo soporte actualmente. La última actualización recibida es fecha de 2009^{vi}, y, a fecha de publicación de este texto, presenta características en fase de pruebas como se comentó en 3.2.2 *Herramientas de análisis 2D* y algunos errores de procesado (ver 5.1.6 *Comparativa de Resultados del Módulo Parámetros con el NIST, Algoritmo de Referencia*).

Con todo, es importante destacar que el algoritmo del *NIST* ha sido una referencia esencial para la realización del proyecto *VisualSR2D*, software de aplicación de la Norma ISO 5436-2 desarrollado durante este Trabajo de Fin de Grado.

De hecho, la mentalidad inicial de desarrollo de *VisualSR2D* fue emular cada una de las herramientas de análisis del *NIST*, tomándolo a este como referencia de validez de resultados. Posteriormente se hizo hincapié en mejorar aquellas áreas susceptibles de cambios que favorezcan al usuario, y que pudieran estar más desarrolladas en otras referencias, que serán tratadas más adelante.

Así, por ejemplo, para la aplicación de la Norma ISO 5436, *VisualSR2D* incorpora un generador automático de ficheros *.smd*, de forma que un usuario no experimentado puede pasar de tardar días a minutos en construir su propio fichero a partir de sus datos de partida, vector con los datos de su perfil.

Finalmente, aclarar que aunque *VisualSR2D* y sus múltiples subfunciones serán descritos en profundidad en el *Capítulo 4: VisualSR2D*, se ha considerado apropiado establecer relación con el *NIST* desde este punto en el que su sistema ha sido descrito, queriendo así destacar de nuevo que es a partir de este algoritmo del *NIST* como nace *VisualSR2D*.

^{vi} <http://physics.NIST.gov/VSC/jsp/News.jsp>

3.3 EL SOFTWARE DEL NPL

El módulo del *NPL* dedicado a la aplicación de los estándares ISO 5436-2 es denominado *Softgauges*, y puede encontrarse en el sitio web <http://161.112.232.32/softgauges/default.htm>. En concreto, hace referencia a la versión del año 2000 de dicha norma, posterior a la que utiliza el algoritmo del *NIST*.

Softgauges puede dividirse en cuatro secciones principales:

- Base de datos de referencia
- Algoritmo de referencia
- Convertidor de archivos
- Información diversa: Especificación del filtro Gaussiano, de los parámetros superficiales y de parámetros del elemento geométrico; referencias; contacto; mapa del sitio web etc...



Figura 13. Vista principal del sitio web de Softgauges

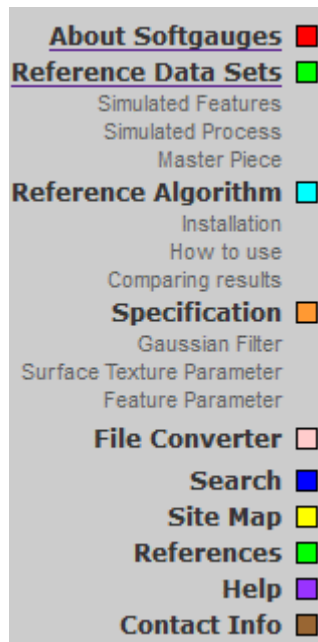


Figura 14. Menús del sitio web de Softgauges

3.3.1 Base de datos de referencia de *Softgauges*

Softgauges ofrece una base de datos de archivos Tipo F1, que fueron descritos en el *Capítulo 2: La Norma ISO 5436-2*. Concretamente, su utilidad fue comentada en *2.4 Comentarios Finales sobre la Norma ISO 5436*.

Esta base de datos, de la que han sido extraídos muchos de los perfiles de la base de datos del *NIST* (ver *3.2.1 Base de datos 2D del NIST*), está dividida a su vez en tres categorías distintas:

- Perfiles matemáticos (*Simulated Feature Profiles*): Aquellos perfiles que han sido generados computacionalmente a partir de funciones matemáticas tales como senos o cosenos, o impulsos. Pueden resultar muy útiles en etapas de comparación de resultados preliminar debido a la facilidad en la interpretación de sus parámetros.
- Perfiles con proceso de fabricación simulado (*Simulated Manufacturing Process Profiles*): Estos perfiles simulan características propias de técnicas de acabados superficiales, por lo que resultan bastante más realistas que los anteriores, si bien su análisis es más complejo.
- Perfiles reales (*Masterpiece profiles*): Perfiles obtenidos directamente del análisis de acabado superficial de piezas patrón mediante la instrumentación adecuada.

3.3.2 Algoritmo de referencia de *Softgauges*

La implementación del algoritmo de referencia de *Softgauges* es muy diferente a la del *NIST*. Mientras que este último optaba por un desarrollo e interfaz web, *Softgauges* ofrece al usuario la descarga de un fichero ejecutable desde su página web.

Este fichero, programado en Java, ofrece la posibilidad de cargar un archivo estandarizado *.smd*, realizar un análisis paramétrico a partir de un filtro Gaussiano y exportar los resultados, tanto en formato *.smd* como en *.html*.

En primer lugar, haciendo referencia a la carga de ficheros *.smd*, hay que destacar el contraste que existe con el módulo de carga del *NIST*, que resultaba extremadamente rígido.

En el caso del software de *Softgauges*, la entrada es, dentro de la Norma ISO 5436, completamente abierta. Así por ejemplo mientras que el algoritmo del *NIST* solo admite ficheros cuyo valor en el campo *The_Revision_Number* es *ISO 5436 - 1999*, número de revisión que ellos usan, el algoritmo de *Softgauges* está abierto a cualquier revisión de la norma.

Adicionalmente, si se detectan errores en la carga del archivo, la aplicación Java del *NPL* incorpora módulos de reconocimiento, e informará al usuario del problema detectado, que puede ir desde el final inesperado de una línea hasta errores en la suma de verificación *checksum*.

Esta flexibilidad es de agradecer desde el punto de vista de usuario de la aplicación, ya que simplifica mucho el tratamiento y creación de ficheros estandarizados, mejorando así la curva de aprendizaje de usuarios no experimentados.

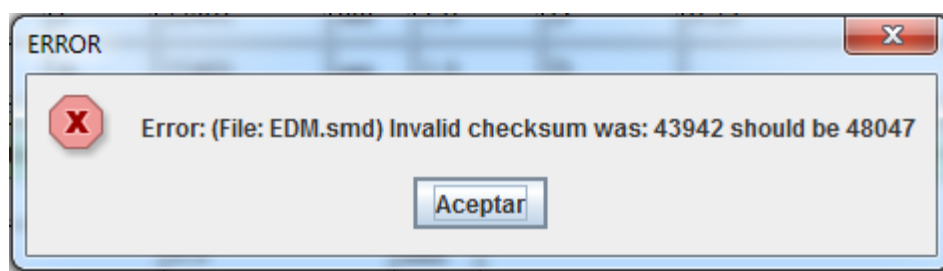


Figura 15. Intento de carga de un fichero con checksum erróneo en el software de *Softgauges*

Hay que destacar que aunque el sitio web de *Softgauges* hace referencia a la revisión del año 2000 de la Norma ISO 5436, el título de la aplicación Java hace referencia a la revisión del año siguiente, 2001, que es precisamente la que ha sido desarrollada en detalle en el *Capítulo 2: La Norma ISO 5436-2*, por lo que es razonable suponer que esta aplicación está actualizada a la revisión de la Norma considerada durante la realización de este proyecto. La ventana principal de esta aplicación se muestra en la figura 16.

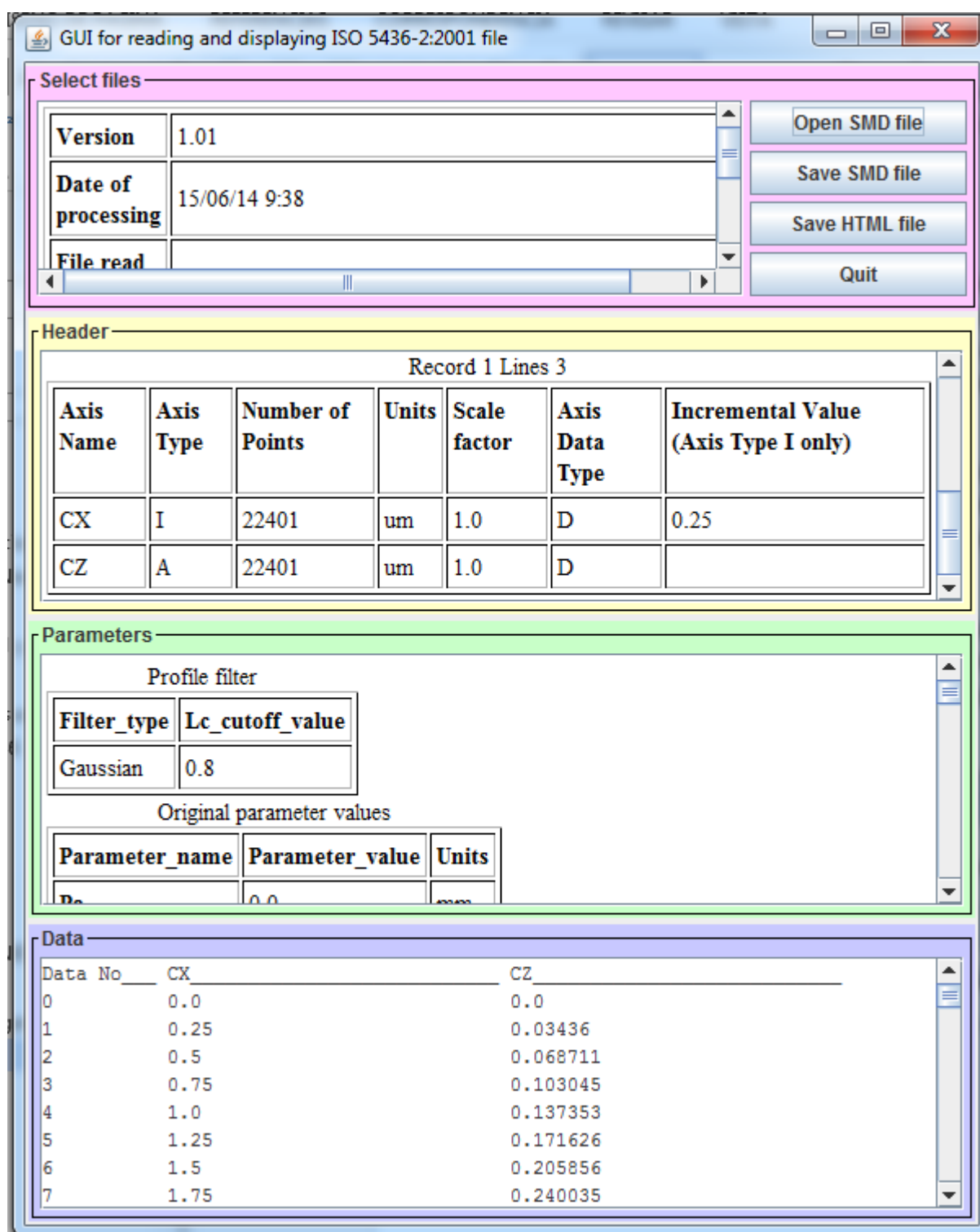


Figura 16. Aplicación Java de Softgauges

En esta interfaz gráfica se distinguen tres secciones:

- *Select files* (selección de fichero): Hace referencia al fichero seleccionado por el usuario para su análisis.

- *Header* (cabecera): Contiene la información obligatoria para la caracterización del perfil, tal y como fue descrita en 2.4.1 *Registro 1 – Cabecera*.
- *Parameters* (parámetros): Puede considerarse como parte de la información opcional y no obligatoria que pueden incluir los ficheros *.smd* de acuerdo a la Norma. Este campo fue tratado en 2.4.2 *Registro 2 – Otra información (opcional y no obligatoria)*.

Nótese no obstante que esta aplicación no hace interpretación de aquellos campos del Registro 2 distintos a *PROFILE_FILTER* y *PARAMETER_VALUE*, que son los que contienen la información necesaria para realizar un análisis paramétrico.

- *Data* (datos): Muestra los valores de los ejes *CX* y *CZ* tal y como están contenidos en el fichero *.smd*. Llegados a este punto es importante resultar que, a diferencia del *NIST*, *Softgauges* no ha sido desarrollado para trabajar con perfiles tridimensionales, quedando su campo de actuación limitado al análisis de datos 2D.

Estudiado el módulo de carga y las secciones principales de la aplicación Java de *Softgauges*, se pasa ahora a detallar las funcionalidades que el algoritmo ofrece desde el punto de vista de herramientas de análisis 2D.

Es aquí donde el algoritmo del *NPL* presenta severas desventajas frente al del *NIST*. Mientras que este último ofrecía al usuario un amplio abanico herramientas y posibilidades de análisis (véase 3.2.2 *Herramientas de análisis 2D del NIST*), el algoritmo del *NPL* únicamente permite el análisis de parámetros, con opción a la aplicación previa de un filtro de tipo Gaussiano exclusivamente.

Es más, el proceso que se sigue a la hora de aplicar estos parámetros es un tanto peculiar, y utiliza como entradas de información únicamente campos del fichero *.smd*, esto es, la interfaz gráfica no facilita campos en los que el usuario pueda definir el tipo de filtrado que desea, como puede observarse en la figura 16, y ni siquiera llega a reproducirse una representación gráfica del perfil.

Es por esto que el algoritmo de referencia de *Softgauges*, más que como una herramienta de análisis propiamente dicha, puede considerarse como una herramienta de interpretación de ficheros *.smd*.

El procedimiento para obtener los valores de los distintos parámetros que caracterizan un perfil, y que serán detallados en 5.1 *Parametrización*, es el siguiente:

- A partir del fichero *.smd* original que contiene los datos a analizar, debe realizarse una modificación en su estructura para añadir, si no los tuviera,

los campos *PROFILE_FILTER* y *PARAMETER_VALUE*, este último tantas veces como parámetros quieran calcularse.

Este proceso puede realizarse manualmente, utilizando editores de texto tales como *Notepad++*, o, de una forma más rápida y recomendada, utilizando el Convertidor de Ficheros de la página web de *Softgauges*, que será estudiado en 3.3.3 *Convertidor de archivos del NPL*.

El aspecto del Registro 2 – Otra información tras la inclusión de estas líneas se muestra en la figura 17.

```
Date 18-Feb-2004NULCRLF
TIME 16:51NULCRLF
CREATED_BY University of HuddersfieldNULCRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Pa NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Ra NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Wa NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Pq NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Rq NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Wq NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Pku NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Rku NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Wku NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Psk NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Rsk NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Wsk NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Pp NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Rp NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Wp NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Pv NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Rv NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Wv NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Pz NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Rz NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Wz NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · PSm NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · RSm NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · WSm NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Pc NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Rc NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Wc NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Pt NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Rt NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PARAMETER_VALUE NUL · Wt NUL · 0.0 mm NUL · 0.0 CRLF
PROFILE_FILTER Gaussian NUL · Lc 0.8 CRLF
ETXCRLF
```

Figura 17. Registro 2 de un fichero .smd preparado para utilizar la aplicación de Softgauges

La figura 17 incluye todos los parámetros que el algoritmo de *Softgauges* es capaz de calcular.

Puede observarse que el valor asignado a los parámetros es de 0 *mm* en todos los casos ya que realmente son precisamente estos valores los que se quiere que el algoritmo calcule. De igual forma, si fueran conocidos otros valores, estos podrían incluirse aquí a modo de comparación con los obtenidos por el algoritmo de *Softgauges*.

La última columna, también de valores nulos sin unidades, representa la incertidumbre de medida.

La figura 17 ha sido obtenida a partir del Convertidor de Archivos del sitio web de *Softgauges*, y hay que destacar que hasta este punto ya se ha cometido un error: se han asignado unidades, *mm*, a parámetros adimensionales, a saber, *Rsk*, *Wsk*, *Psk*, *Rku*, *Wku* y *Pku*, cuya definición matemática se da en 5.1.4 *Parámetros de Forma*.

- El archivo ya modificado es cargado en la aplicación Java de *Softgauges*, que automáticamente procesará los parámetros tanto del perfil primario como de los perfiles de rugosidad y ondulación obtenidos a partir del filtrado del perfil en base al valor de *Lc* definido en el fichero *.smd*. En 5.2 *Introducción al Filtrado: El Filtrado en la Ingeniería* se detalla cómo la aplicación de un filtro está relacionada con estos tres perfiles.

Sea cual sea el tipo de filtro definido en el fichero *.smd*, este algoritmo utilizará un filtro Gaussiano, lo que supone una limitación importante respecto al algoritmo del *NIST*, que ofrecía gran cantidad de opciones de filtrado al usuario (3.2.2.1 *Filtrado/Parámetros de acabado superficial*).

- Se exporta un fichero final, que puede ser tanto *.smd* como *.html*. En este fichero, dentro del Registro 2 – Otra Información, se habrán incluido tantas líneas *PARAMETER_VALUE* como líneas *PARAMETER_VALUE* tenía el fichero original, añadiendo a cada una de estas nuevas líneas una etiqueta *REF* y el valor calculado por el algoritmo de *Softgauges*.

El fichero exportado conservará de esta forma los valores paramétricos del fichero original (incluso si estos eran nulos).

La figura 18 ejemplifica estos resultados. Nótese en esta misma figura que tras la ejecución del algoritmo ha sido subsanado el error en las unidades de los parámetros adimensionales.

```

PARAMETER_VALUE NUL · PSm NUL · 0.0 · mm NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · RSm NUL · 0.0 · mm NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · WSm NUL · 0.0 · mm NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · Pc NUL · 0.0 · mm NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · Rc NUL · 0.0 · mm NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · Wc NUL · 0.0 · mm NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · Pt NUL · 0.0 · mm NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · Rt NUL · 0.0 · mm NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · Wt NUL · 0.0 · mm NUL · 0.0 CR LF
PROFILE_FILTER Gaussian NUL · Lc 0.8 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Pa NUL · 1.0925216265756432 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Ra NUL · 1.086987727083657 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Wa NUL · 0.008364598640263756 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Pq NUL · 1.2247448831870191 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Rq NUL · 1.219404484607665 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Wq NUL · 0.00929073314585581 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Pku NUL · 1.8333333372949705 · 1 NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Rku NUL · 1.8392111826584592 · 1 NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Wku NUL · 1.5000000000000693 · 1 NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Psk NUL · 0.028476907497419303 · 1 NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Rsk NUL · -0.03962182558434856 · 1 NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Wsk NUL · -0.04801687019506705 · 1 NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Pp NUL · 2.232552507336017 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Rp NUL · 2.2260718445836227 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Wp NUL · 0.013139080819301319 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Pv NUL · 2.232552507336017 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Rv NUL · 2.2260718445836227 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Wv NUL · 0.013139080819301319 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Pz NUL · 4.465105014672034 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Rz NUL · 4.4521436891672455 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Wz NUL · 0.026278161638602637 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:PSm NUL · 320.0 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:RSm NUL · 160.0 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:WSm NUL · 320.0 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Pc NUL · 4.465105014672031 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Rc NUL · 3.562355881917888 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Wc NUL · 0.026278161638602637 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Pt NUL · 4.465105014672034 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Rt NUL · 4.4521436891672455 · um NUL · 0.0 CR LF
PARAMETER_VALUE NUL · REF:Wt NUL · 0.026278161638602637 · um NUL · 0.0 CR LF
ETX CR LF

```

Figura 18. Ejemplo de una parte del registro 2 de un fichero .smd resultante tras utilizar el software de Softgauges. Nótese la etiqueta REF antes de incluir los valores de los parámetros calculados por dicho software.

Finalizado el análisis del algoritmo de cálculo de *Softgauges*, hay ciertas consideraciones^{vii} de interés acerca del proceso interno que realiza la aplicación:

- Para el análisis de parámetros de rugosidad y ondulación, el software utiliza únicamente un filtro Gaussiano con longitud de onda de corte L_c , consistente con los estándares ISO 11562.
- Se realizan dos hipótesis para el cálculo de estos parámetros:
 - El perfil ha sido previamente filtrado para eliminar forma y componentes de longitud de onda menor a aquellas asociadas a la escala de rugosidad (asociadas a λ_s , de nuevo puede consultarse 5.2 *Introducción al Filtrado: El Filtrado en la Ingeniería*).
 - El perfil está digitalizado de forma que el eje X es de tipo incremental, y sus puntos están equiespaciados.
- Para reducir la distorsión en los extremos del perfil se elimina una longitud básica a cada extremo del perfil original. Es corriente aplicar esta medida antes de utilizar un filtro Gaussiano, como se explica en 5.4.1 *Consideraciones generales acerca del filtro Gaussiano*.
- Para reducir la distorsión debido a que el perfil es finito, se exige un número de longitudes básicas mínimo de 3.
- Para reducir la distorsión debida a la digitalización del perfil, se exige un número de puntos por longitud básica mínimo de 50.

3.3.3 Convertidor de archivos del *NPL*

El convertidor de archivos que del *NPL* también está alojado en *Softgauges*, y puede accederse a él en <http://161.112.232.32/softgauges/Converter.aspx>.

Este convertidor permite transformar un fichero entre cualesquiera de los siguientes formatos:

- *.smd*
- *.txt*
- *.prf*
- *.sdf*

^{vii} http://161.112.232.32/softgauges/Ref_Algo_Overview.htm

A efectos de este trabajo únicamente los dos primeros son importantes.

Para los ficheros *.txt*, la web de *Softgauges* avisa de que el formato debe cumplir un estándar, a saber, que la primera línea sea el valor incremental del eje *X*, y el resto de líneas los sucesivos valores de ordenadas *Z* del perfil, siendo el primer valor el que correspondería a $x=0$, el segundo a $x=\text{incremento de } x$, el tercero a $x=2*\text{incremento de } x$ etc...

Esto puede resultar muy interesante para usuarios sin experiencia en el formato Tipo F1 descrito en 2.3 *Formato de Archivos para Datos de Referencia de Tipo F1*, ya que el algoritmo automáticamente adapta los datos del usuario a una estructura adecuada, computando además la suma de verificación, *checksum*.

Por otro lado, la conversión de *.smd* a *.smd* también puede resultar conveniente, ya que el convertidor añade también automáticamente las líneas *PARAMETER_VALUE* necesarias para que el algoritmo tratado en 3.3.2 *Algoritmo de referencia de Softgauges* realice un cálculo paramétrico, como ya se explicó en dicho apartado.

Adicionalmente, el convertidor permite añadir automáticamente la longitud de onda de corte *Lc* que se desea aplicar como filtro en la ejecución de la aplicación principal Java.

Es necesario resaltar de nuevo como desventaja el hecho de que el único tipo de filtro aplicable es el filtro Gaussiano, como puede observarse en la figura 19.

Data file format converter

3. SMD File Header Wizard:

Select filter option of record 2 of SMD file[1]:

☐ None Filtering

☒ Gaussian Filtering

Cut Off Length: *Lc* (mm) [2]

☒ Including Parameters[2]

Figura 19. Vista general de la interfaz de usuario del convertidor de archivos de Softgauges

3.3.4 Comentarios acerca de *Softgauges*

A continuación se analiza la manera en la que el *NPL* aplica la Norma ISO 5436-2, y se realiza una comparación con el enfoque del *NIST*.

Se ha visto que para poder utilizar su algoritmo de la aplicación Java de *Softgauges* es necesario añadir información en el Registro 2 del archivo *.smd* que contiene al perfil a analizar, especificando el tipo de filtro a utilizar durante el proceso, que estaba limitado a filtro *Gaussiano*.

La Norma ISO, no obstante, especifica claramente que en el Registro 2 debe incluirse otra información relativa al perfil. Esto implica que si se añade la línea *PROFILE_FILTER*, esta debe incluir información sobre el tipo de filtrado que ya ha recibido el perfil, y por tanto, todos los puntos pertenecientes al Registro 3 – Datos, se suponen que son de un perfil que ha recibido el filtrado especificado bajo la etiqueta *PROFILE_FILTER*.

Adicionalmente, la Norma también manifiesta que "*los datos [del archivo .smd] deben poder emplearse sin la información precedente del registro 2*".

La conclusión es que la interpretación que *Softgauges* hace de la norma no es completamente rigurosa.

Por un lado, los campos pertenecientes al Registro 2 – Otra información (opcional y no obligatoria) son necesarios para el procesado, y por otro se utiliza como variable de entrada algo que realmente ya de por sí es un resultado, pues contenida bajo la etiqueta *PROFILE_FILTER* se encuentra información relativa a las técnicas de filtrado ya aplicadas a los datos contenidos en el fichero, no a las técnicas de filtrado a aplicar.

Dejando a esto a un lado, es interesante comparar lo que ofrece el *NPL* a través de *Softgauges* y lo que ofrece el *NIST*.

En primer lugar, puede afirmarse que las herramientas que *Softgauges* proporciona para la generación de ficheros *.smd* que sigan los estándares ISO son un punto a favor del desarrollo inglés. Recuérdese que el *NIST* no solo no ofrecía ninguna alternativa para la generación de estos ficheros, lo que podía limitar el uso de sus algoritmos de una forma rápida para usuarios no experimentados, sino que además era completamente rígido en la estructura del archivo, abortando el proceso de forma repentina si no se seguían estrictamente sus pautas, que dicho sea de paso, no tienen por qué ser seguidas para realizar un cumplimiento riguroso de la Norma ISO aquí analizada.

En el extremo opuesto está *Softgauges*, que además de ser flexible con todo aquello que quede bajo la Norma ISO y tener un algoritmo de reconocimiento de información francamente bueno, permite la generación de ficheros estandarizados a partir de simples archivos de texto *.txt*, de una forma rápida y cómoda.

En segundo lugar, y referente a herramientas de análisis 2D, la balanza se invierte, y lo que el *NIST* ofrece está muy por encima de las posibilidades del algoritmo de *Softgauges*.

Así, mientras que *Softgauges* únicamente permite el cálculo de parámetros con o sin previa aplicación de un filtro Gaussiano, de una además algo enrevesada y que roza los límites de validez de la Norma ISO 5436-2, el *NIST* ofrece una amplia gama de técnicas de análisis, dividida en distintos módulos y organizada de forma muy intuitiva a través de interfaces gráficas.

En definitiva, si lo que desea es utilizar técnicas de análisis de acabado superficial, el *NIST* es sin duda la referencia.

Un último punto a destacar en este apartado es el aparente proteccionismo y falta de compatibilidad entre estas dos referencias. Cada una utiliza un sistema propio que dificulta lo que posiblemente sea el objetivo último de la Norma ISO 5436: establecer patrones de software.

Así por ejemplo, imagínese que se aplica un filtro 2RC a un perfil propio utilizando el algoritmo del *NIST* (véase 3.2.2.1 *Filtrado/Parámetros de acabado superficial*). Se pretende ahora realizar un análisis de los parámetros del perfil filtrado, y comparar los resultados con los obtenidos a través del algoritmo del *NPL*. Pues bien, como al exportar el perfil el *NIST* no deja huella en el fichero *.smd* del tipo de filtrado aplicado al perfil, el algoritmo del *NPL* no tendría referencia acerca de las longitudes básicas del perfil, y no podría calcular dichos parámetros en base a longitudes básicas.

Es más, incluso si la tuviera, como la aplicación que hace de la Norma es un tanto peculiar, el cálculo de los parámetros de este perfil filtrado no sería posible, pues automáticamente al especificar en el fichero *.smd* un valor de *Lc* el algoritmo de *Softgauges* interpretaría que lo que debe hacer es aplicar un filtro Gaussiano con dicha *Lc* al perfil (que sería el perfil al que ya ha sido aplicado el filtro 2RC), obteniendo así los parámetros de un tercer perfil doblemente filtrado.

En definitiva, ambos desarrollos de la Norma son *culpables* de no ofrecer una intercompatibilidad que, sin duda, mejoraría la experiencia general de usuarios de sus sistemas, y que probablemente sea lo que desde un principio se perseguía con la creación de la Norma ISO 5436.

3.4 EL SOFTWARE DEL PTB

Existe un tercer desarrollo de la Norma ISO 5436 llamada *RPTB*, ofrecida desde la página web del *PTB*, que puede encontrarse en el siguiente sitio web: http://www.ptb.de/en/org/5/51/517/rptb_web/wizard/greeting.php.

De acuerdo a su propia web, la finalidad de *RPTB* es disponer de un software informático de fácil acceso para el cálculo de los parámetros de rugosidad en base a los estándares internacionales. También queda reflejado que el algoritmo que ofrecen cumple con las condiciones de las normas de gestión de calidad de software de acuerdo a la Norma ISO 12119.

El diagrama funcional del software de *RPTB* se muestra en la figura 20, donde queda reflejado que consta de dos partes diferenciadas:

- *libRPTB*: En este módulo se produce la carga y exportación de archivos estandarizados tanto *.pr* como *.smd*. De nuevo en este caso los ficheros *.smd* serían los de interés para el presente trabajo. De nuevo, al igual que en el software del *NPL*, este software únicamente ofrece la posibilidad de trabajar con perfiles bidimensionales.

También en este módulo se llevan a cabo las técnicas de *Error Handling*, esto es, tratamiento de errores, lo que previsiblemente supone un avance respecto al módulo de carga del *NIST*, cuyo tratamiento de errores se reduce a un pasa – no pasa de archivos que cumplan o no todos sus criterios. El resultado es que a efectos de carga de archivos el software del *PTB* se pone al nivel del de *Softgauges (NPL)*.

Otra característica de este módulo es permitir el filtrado de perfiles, bien utilizando un filtro Gaussiano (5.4 *Filtro Gaussiano*), bien utilizando un filtro 2RC (5.5 *Filtro 2RC*).

Finalmente, es desde *libRPTB* como se obtienen también los valores de los principales parámetros del perfil bajo análisis, con opción a previo filtrado.

- *libTPTB*: Consta de todas las funciones necesarias para eliminar forma y redondez del perfil a estudiar.

De acuerdo al esquema de la figura 20, ambos submódulos cuentan con sus correspondientes interfaces gráficas, llamadas *RPTB_IDL* y *TPTB_IDL* respectivamente.

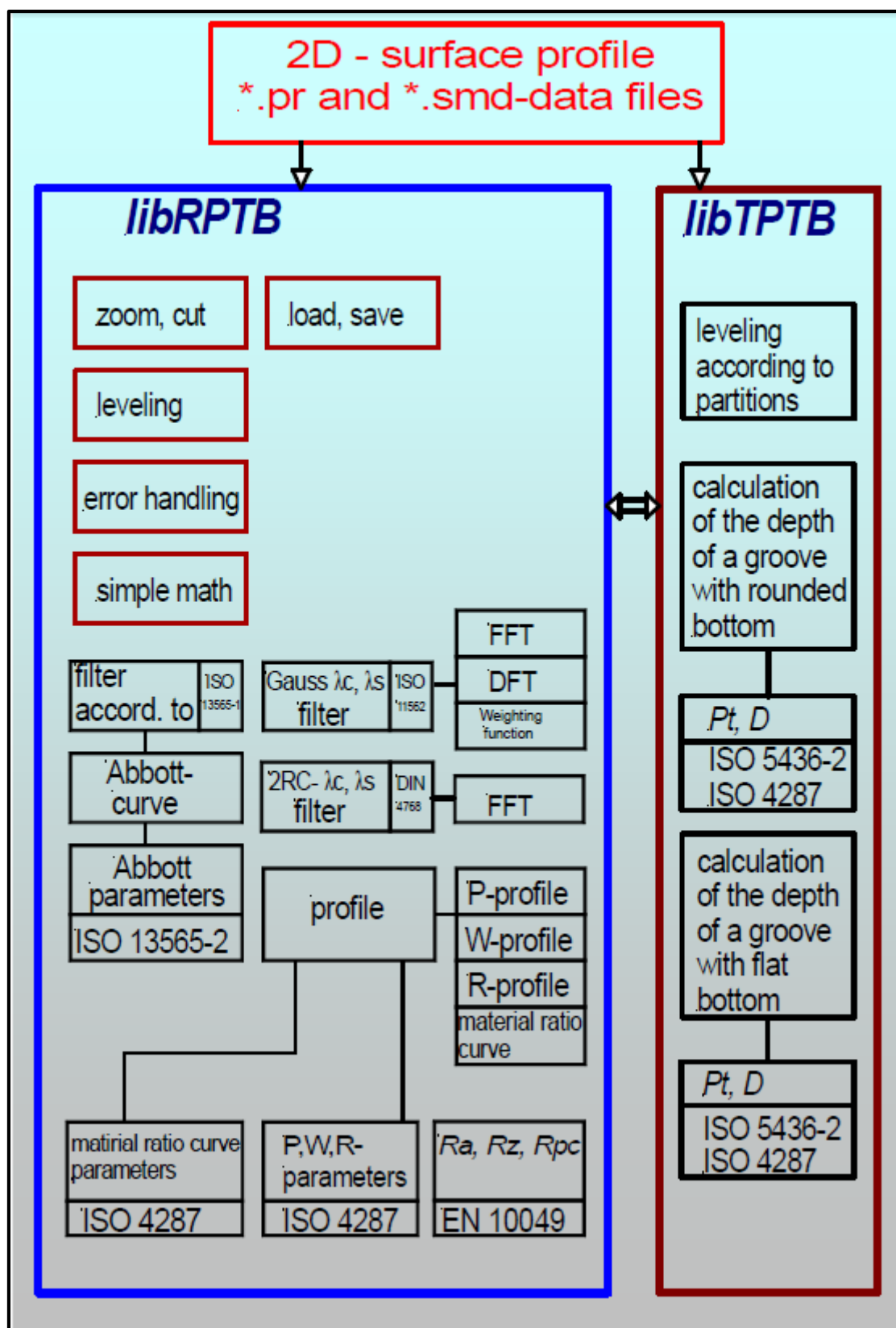


Figura 20. Esquema del software de RPTB

La página principal de *RPTB* también ofrece información adicional enfocada a un público no experimentado.

De esta forma se recoge tanto un diagrama acerca de los principios básicos del análisis de acabados superficiales. Esta información es adjuntada a continuación, ver figura 21, ya que se considera que puede servir como referencia básica a este nivel en el que todavía no ha sido desarrollada en profundidad la base matemática detrás del filtrado o el cálculo paramétrico, que será estudiada en 5.1 *Parametrización* y en 5.2, 5.3, 5.4 y 5.5, apartados dedicados al filtrado.

Basic principles of roughness measurement

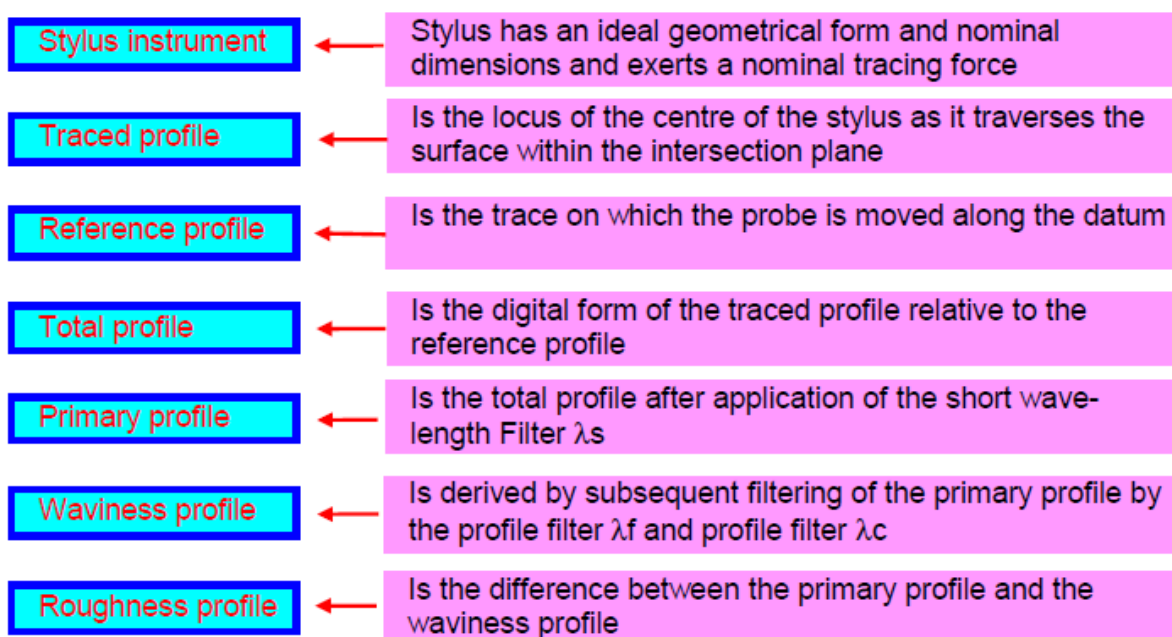


Figura 21. Principios básicos del análisis de acabados superficiales (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2014).

En la página principal del proyecto *RPTB* quedan también descritos los formatos *.pr*, formato propio creado por este organismo y que no resulta de utilidad para el presente trabajo por sus pocas posibilidades de exportación, y *.smd*, existiendo un texto que describe en detalle este formato de forma análoga a como lo hace la propia Norma ISO 5436-2, y parece exento derechos de autor, lo que puede resultar una alternativa muy útil a la distribución de la Norma original.

Esta descripción del formato *.smd*, desarrollada por el *PTB*, está incluida en el directorio *\Material adicional\Definición archivos Tipo F1 (.smd) según el PTB* del CD anexo, y también puede encontrarse en:


http://www.ptb.de/en/org/5/51/517/rptb_web/doc/en/smd_description_internet.pdf

No obstante, la realidad es que la descripción del formato que hace *RPTB* no es exactamente igual a la que queda recogida en la Norma ISO 5436-2. Las principales diferencias se encuentran en el encabezado, concretamente en la definición de los ejes, tal y como queda reflejado en la figura 22.

1	ISO 5436 - 2000	NUL505	NULCRLE
2	PRF	NUL 0	PTB_2d_k
3	CX	NUL A	28000 nm
4	CZ	NUL A	28000 nm
5	ETX	NUL	1.0e0 D
1	ISO 5436 - 2000	NUL505	NULCRLE
2	PRF	NUL 0	PTB_2d_k
3	CX	NUL A	28000 um
4	CZ	NUL A	28000 um
5	ETX	NUL	1.0e0 D


Figura 22. Interpretación del Registro 1 - Cabecera según el PTB (arriba) y según la Norma, el NIST y el NPL (abajo)

Esta discrepancia con la Norma conlleva problemas de compatibilidad al cargar ficheros estandarizados provenientes de fuentes como el *NIST* o el *NPL*. Aunque el sistema parece reconocer el perfil (véase figura 23), se produce un error al intentar acceder a las funciones de filtrado, representado en la figura 24.



Status of uploaded data file

A short test of the transfered data is carried out...



EDM.smd contains 22445 lines of data (incl. header)

ISO 5436 - 1999EDM
PRF 2 ISO5436
CX I 22401 um 1.0e0 D 0.25
CZ A 22401 um 1.0e0 D

file is smd style

Select filter options

Figura 23. Reconocimiento de un perfil del NIST por parte del software del PTB

Dear user,
preprocessing of the uploaded data file failed.

Please go back and check the data source.

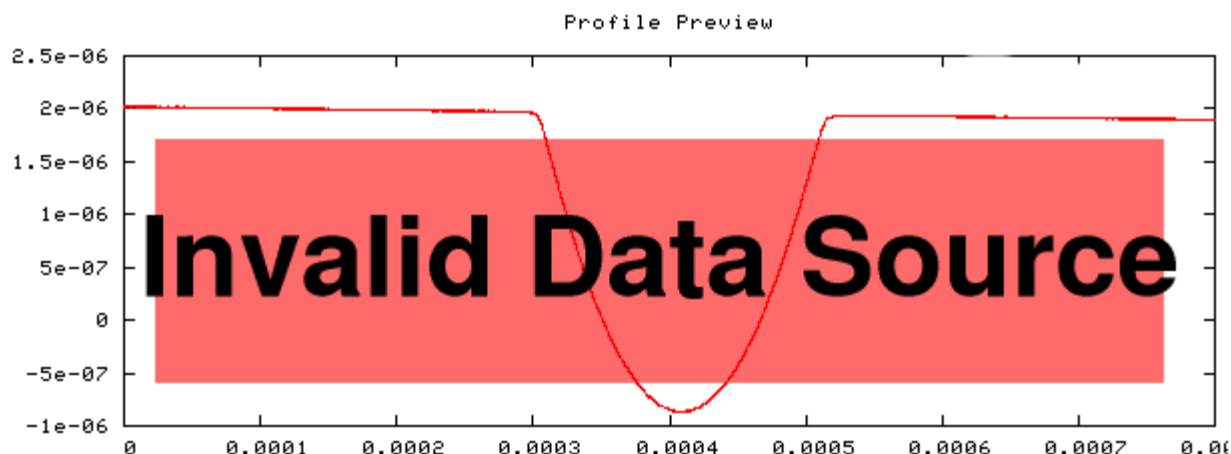


Figura 24. Error en el software del PTB

De esta forma, para poder acceder a las funciones de filtrado del *PTB*, se hace necesaria la carga de un fichero que cumpla sus estándares, distintos a los ISO.

En lo que sigue se utilizará el perfil *505.smd*, proporcionado por el propio *PTB*, como fichero a analizar. Este fichero puede encontrarse en el *CD* adjunto a este trabajo, en el directorio *\Material adicional\Ejemplo PTB*. La información recogida en el encabezado de este fichero puede encontrarse en la figura 22 (arriba).

Una peculiaridad de *505.smd* es que el tipo de datos del eje *X* es absoluto, por lo que los puntos de éste eje también quedan recogidos en el Registro 3 – Datos.

El *PTB* opta por ir alternando puntos del eje *X* y el eje *Z*. Este planteamiento no es unánime entre otros desarrollos de la norma. Si por ejemplo se carga este perfil en el software de *Softgauges* la interpretación, de acuerdo a la figura 22, sería que los primeros 28000 puntos corresponden al eje *X* y los 28000 puntos restantes al eje *Z*, resultando de nuevo en problemas de compatibilidad entre softwares de referencia.

3.4.1 Algoritmo de referencia del *PTB*

El *PTB* opta por un planteamiento de interfaz web similar al que ofrecía el *NIST*, si bien en este caso la estructura utilizada, en vez de modular, es de una sucesión de ventanas, al final de las cuales se exportan todos los datos.

Una vez cargado un archivo *.smd* compatible con su sistema, el primer paso es definir un filtro (véase la figura 25). Los filtros a elegir son Gaussiano y 2RC, ofreciendo de este modo posibilidades similares a las del *NIST*, y situándose un paso por delante del *NPL*, al menos en lo referente a técnicas de filtrado.

Una vez escogido el filtro, a través del botón "*Set Evaluation Length*" se pasa al siguiente menú, en el que debe especificarse el número de longitudes básicas contenidas en la longitud de evaluación (véase la figura 26). Este proceso quizás sería susceptible de ser automatizado, ya que su implementación es sencilla y facilitaría al usuario el uso del algoritmo.

Posteriormente, se eligen los parámetros que se desea que el programa calcule, tanto para el perfil primario, *P*, como para los perfiles de rugosidad, *R*, y ondulación, *W*, que se obtendrán tras el filtrado. Como ejemplo se considera la figura 27.

Completado el proceso anterior, pueden exportarse los resultados, que constan de:

- El perfil original: El algoritmo del *PTB* no realiza modificaciones en el perfil analizado, ni siquiera los campos opcionales, aunque esta información puede haber cambiado (por ejemplo el campo *PROFILE_FILTER*).
- Un archivo *.pdf* con los resultados obtenidos del análisis.

Este informe, además de reflejar los valores de todos aquellos parámetros seleccionados y las condiciones en las que han sido obtenidos, incluye también representaciones gráficas de cada uno de los perfiles primario, de rugosidad y de ondulación. Un ejemplo del mismo obtenido a partir del archivo *505.smd* y con las opciones seleccionadas en las figuras 25 y 26 se incluye en el *CD* anexo a este texto, en el directorio *\Material adicional\Ejemplo PTB*.

Adicionalmente, también incluye las curvas de Abbott – Firestone y de Densidad Espectral de Potencia de cada uno de dichos perfiles, acercándose así el software del *PTB* a las posibilidades que el algoritmo del *NIST* ofrece.

Existen no obstante dos limitaciones importantes respecto a este último punto:

- En primer lugar no pueden definirse los métodos/parámetros utilizados durante la determinación de estas curvas.

- En segundo lugar, y más importante, estas curvas se muestran como imágenes incrustadas en el *.pdf*, por lo que se hace imposible una exportación de las mismas, así como cualquier interpretación que vaya más allá de un análisis cualitativo.

Filter options

Settings
spacing discrimination ISO 4287
height discriminations ISO 4287
EN 10049 c1
EN 10049 c2

GAUSS ISO 11562

2RC DIN 4768:1974

1% sampling length
 $\pm 5\%$ Pq/Rq/Wq
+0.5 μm
-0.5 μm

☐ DFT
☒ FFT
☐ weighted average

☐ 2RC

Cut off wave length in μm

λ_c
☐ 80
☒ 250
☐ 800
☐ 2500
☐ 80000

λ_s
☒ 0
☐ 2,5
☐ 8
☐ 25

Set evaluation length

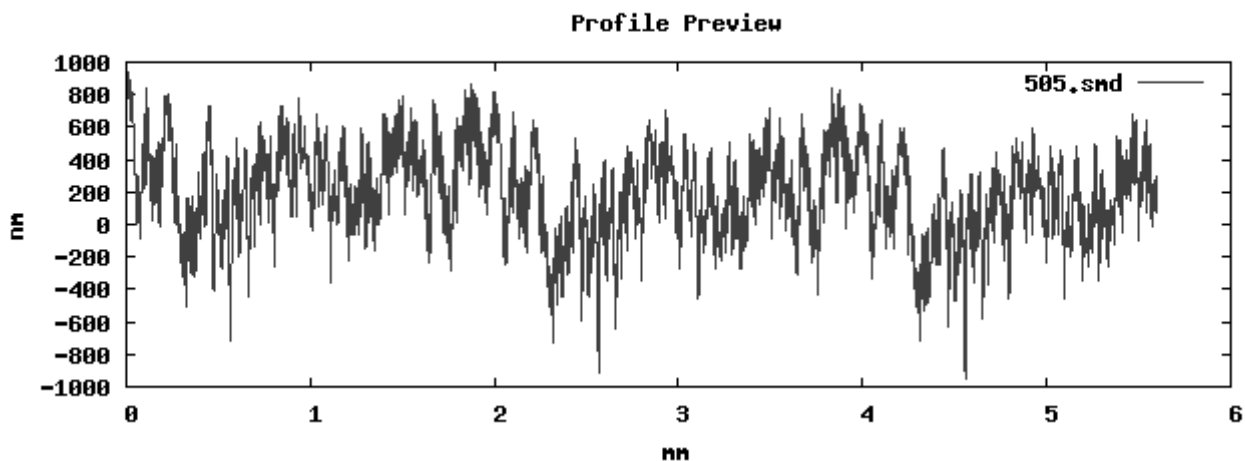


Figura 25. Definición del tipo de filtro a aplicar en el algoritmo del PTB

Set evaluation length

Settings	
spacing discrimination ISO 4287	1% sampling length
height discriminations ISO 4287	$\pm 5\%$ Pq/Rq/Wq
EN 10049 c1	+0.5 μm
EN 10049 c2	-0.5 μm
λ_c	250 μm
λ_s	0 μm
GAUSS ISO 11562	FFT
Number of sampling lengths in the evaluation length	
Start	0
End	0

Select primary profile parameters (Step 1 of 5)

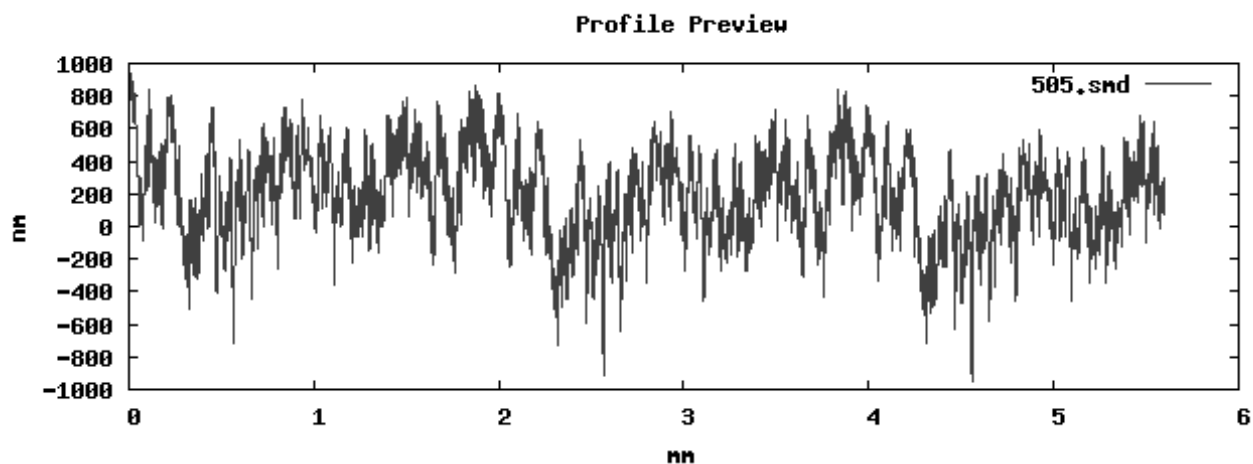


Figura 26. Determinación de las longitudes básicas en el algoritmo del PTB

Waviness profile parameters

	ISO 4287 parameters:	ISO 13565-2 parameters: Filter according to ISO 11562	ISO 13565-2 parameters: Filter according to ISO 13565-1	EN 10049 parameters:
P	configured			
R	configured			
W	<input checked="" type="checkbox"/> W_p <input checked="" type="checkbox"/> W_v <input checked="" type="checkbox"/> W_{max} <input checked="" type="checkbox"/> W_z <input checked="" type="checkbox"/> W_a <input checked="" type="checkbox"/> W_q <input checked="" type="checkbox"/> W_c <input checked="" type="checkbox"/> W_{Sm} <input checked="" type="checkbox"/> W_{dq} <input checked="" type="checkbox"/> W_{sk} <input checked="" type="checkbox"/> W_{ku} <input checked="" type="checkbox"/> W_t			
other	unconfigured			

Proceed with general settings (Step 4 of 5)

Figura 27. Selección de parámetros (concretamente de ondulación) en el algoritmo del PTB

3.4.2 Comentarios acerca de *RPTB*

La conclusión extraíble del análisis del esquema general de funcionamiento, así como del algoritmo del software del *PTB*, es que parece posicionarse en un punto medio entre el *NIST* y *Softgauges* en cuanto a herramientas de análisis se refiere.

Esto es debido a que ciertamente realiza análisis que van más allá del cálculo paramétrico, si bien la utilidad de estos resultados, por carecer de control en los parámetros que los definen y de posibilidades de analizarlos de forma rigurosa, es mucho menor que la de los análogos proporcionados por el *NIST*.

De igual forma el proceso de cálculo paramétrico va en línea con el *NIST*, cargándose un perfil y seleccionándose los parámetros a calcular, alejándose así del particular enfoque que hacía el software del *NPL*.

Pese a todo, el gran defecto de la alternativa de los alemanes tiene que ver con la aplicación de la Norma.

En primer lugar puede afirmarse que su algoritmo no trabaja con perfiles estandarizados, como el lector puede comprobar si intenta cargar en su sistema perfiles obtenidos del *NPL* o del *NIST*.

En segundo lugar, es incomprensible que habiendo creado su propio tipo de fichero, no incluyan una herramienta generadora que facilite la transformación desde ficheros estandarizados a su formato particular. De hecho, durante la realización de este Trabajo de Fin de Grado, ha sido necesario contactar con el *PTB* para conseguir un archivo que cumpliera los estándares de su sistema.

Finalmente, y de forma parecida a lo que ocurría con el algoritmo del *NIST*, su sistema de carga es un *pasa – no pasa*, esto es, si un perfil no es reconocido se cancela la ejecución sin informar al usuario del error que se ha producido. Se ponen en entredicho de este modo las técnicas de *Error Handling* de las que el *PTB* presumía en su esquema general de proceso, véase la figura 21.

La realidad es que cualquiera de los puntos anteriores impide exportaciones e intercompatibilidad entre las distintas referencias aquí tratadas, por lo que son igualmente perjudiciales para el cumplimiento de una Norma cuya base principal es la búsqueda de estándares.

Capítulo 4. VISUALSR2D

4.1 INTRODUCCIÓN, FILOSOFÍA Y ETAPAS EN EL DESARROLLO DE VISUALSR2D

VisualSR2D, nombre completo (*Bidimensional*) **Visual Surface Roughness** es el nombre del software desarrollado en este Trabajo de Fin de Grado como alternativa a los ya presentados en el *Capítulo 3: Desarrollos de la norma ISO 5436-2*.

Puede decirse que el desarrollo de *VisualSR2D* ha tenido dos etapas diferenciadas que, en orden cronológico, han sido:

- Herramientas de análisis 2D
- Aplicación de la Norma ISO 5436-2

Estas dos etapas de desarrollo pueden también ser entendidas como los dos grandes elementos fundamentales que constituyen el programa.

4.1.1 Primera etapa: Herramientas de análisis 2D

La filosofía inicial en el desarrollo de este software fue seguir un desarrollo similar al que el *NIST*^{viii} hace en su módulo de herramientas de análisis dimensional (véase *3.2.2 Herramientas de análisis 2D del NIST*).

De este modo, fueron creándose uno a uno los siguientes módulos:

- *Parameters* (Parámetros)
- *Filter in the Frequency Domain* (Filtrado en el dominio de la frecuencia)
- *Gaussian Filter* (Filtro Gaussiano)
- *2RC Filter* (Filtro 2RC)
- *Power Spectral Density, PSD* (Densidad Espectral de Potencia)
- *Correlation* (Correlación)

^{viii} <http://physics.NIST.gov/VSC/jsp/>

- *Bearing Area Curve BAC* (Curva de la Tasa de Longitud Portante)

En todos los módulos anteriores la referencia de validez de resultados fueron aquellos proporcionados por los módulos análogos del *NIST*.

También desde los inicios de *VisualSR2D* y a la par que estos módulos eran perfeccionados, fue desarrollada una interfaz gráfica (de ahí la palabra **Visual**) que en todo momento ha ido evolucionando a la par que el programa. La razón es que desde un primer momento el enfoque que se dio al programa fue el de poder ser utilizado de forma cómoda y fácil por cualquier usuario.

Hay que aclarar que durante la programación de todas estas herramientas de análisis la aplicación de la Norma ISO 5436-2 quedó en un segundo plano. Únicamente se hacía aplicación de la misma en el instante de la carga de un fichero de datos, con objeto de obtener la información proporcionada en el encabezado de dicho fichero (véase 2.4.1 *Registro 1 – Cabecera*), cuya estructura es rígida.

Esta solución fue una forma de dar un comienzo rápido al proyecto, pudiendo obtener en poco tiempo resultados similares a los que el *NIST* ofrece, pero también planteaba sus desventajas. Debido a que como se ha comentado la estructura del encabezado es rígida, no era necesaria la interpretación de caracteres ASCII, lo que resultaba en que la existencia de campos de información variables hiciese necesario modificar código para garantizar en análisis de todos datos (ordenadas del perfil) que contenía un fichero *.smd*.

La falta de interpretación de caracteres ASCII también imposibilitaba la interpretación de sumas de verificación o *checksums*, campo obligatorio de acuerdo a la Norma (véase 2.4.4 *Registro 4 – Suma de verificación: Checksum*).

De esta forma puede concluirse que en esta primera etapa de *VisualSR2D* el software se beneficiaba de la estandarización que la Norma ISO 5436-2 imponía en las bases de datos referencia utilizadas, la del *NIST* (véase 3.2.1 *Base de datos 2D del NIST* y la del *NPL* (presentada en 3.3.1 *Base de datos de referencia de Softgauges*), pero realmente no llegaba a hacer aplicación de la misma.

Pese a todo, esta forma de trabajar ha reportado grandes beneficios, puesto que todo lo aprendido relativo a MATLAB e interfaces gráficas durante esta primera etapa posibilitó un desarrollo rápido y eficiente de lo que se convertiría en toda la parte de verdadera aplicación de la Norma ISO 5436-2 de *VisualSR2D*.

El *Capítulo 5: Base Teórica de las Herramientas de Análisis de VisualSR2D* está enteramente dedicado a la explicación de la base teórica que sostiene todos y cada uno de los módulos de análisis del programa y a cómo estos módulos se implementan en el programa. Adicionalmente se incluyen comparativas de resultados con aquellos proporcionados por el *NIST*.

4.1.2 Segunda etapa: Aplicación de la Norma ISO 5436-2

La segunda etapa del desarrollo de *VisualSR2D* comienza creándose un generador de ficheros *.smd* independiente de *VisualSR2D*. Esta nueva herramienta si hacía ya un tratamiento riguroso de todos los caracteres ASCII que la Norma ISO 5436-2 recoge.

Es precisamente una versión mejorada de este primer generador de ficheros *.smd* el que *VisualSR2D* incluye en su última versión, tal y como queda establecido en 4.3 *Aplicación de la Norma ISO 5436-2 en VisualSR2D*.

En este punto es necesario realizar un inciso y aclarar que durante esta fase se abandonó el algoritmo del *NIST* como fuente principal de referencia. Este puesto fue ocupado por *Softgauges*^{ix}, software del *NPL* equivalente al *NIST*. Las razones para este cambio quedan recogidas en 3.3.4 *Comentarios acerca de Softgauges*.

El siguiente paso tras la creación del generador de ficheros *.smd* independientes fue una total renovación del módulo de carga de ficheros de *VisualSR2D*, para finalmente crear un módulo de exportación interna que sirviera de enlace para unir finalmente los módulos de filtrado y parametrización del programa, que fueron desde un principio desarrollados por separado.

La filosofía de aplicación de la Norma ISO 5436-2 en *VisualSR2D*, así como las herramientas de las que se vale, se desarrolla en 4.3 *Aplicación de la Norma ISO 5436-2 en VisualSR2D*.

4.1.3 Evolución cronológica de *VisualSR2D*

Explicado el enfoque durante el desarrollo de *VisualSR2D* y la distinción básica entre las dos etapas en las que puede dividirse el desarrollo de este software, se adjunta a continuación un registro detallado de la evolución del mismo:

Tabla 11. Registro de cambios asociados al desarrollo de *VisualSR2D*

Mes	Día	Cambio(s)
Marzo	27	Input desde fichero .txt con datos Primera interfaz gráfica Primer borrador de filtrado en el dominio de la frecuencia

^{ix} <http://161.112.232.32/softgauges/>

Abril	1	Cambio de input a ficheros .smd de acuerdo a normativa ISO 5436-2:2001
	3	Variación en datos de entrada. No necesaria longitud de muestreo por capacidad de lectura desde el .smd
	9	Añadido Filtro Gaussiano Añadido Filtro 2RC (sin concordancia de resultados con <i>NIST</i>)
	11	Añadidos parámetros de amplitud <i>Ra</i> , <i>Rq</i> , <i>Rp</i> , <i>Rv</i> , <i>Rt</i> Añadido parámetro de espaciado <i>RSm</i>
	16	Añadidos parámetros <i>Rsk</i> y <i>Rku</i> Superada la limitación de no poder añadir letras griegas a la interfaz
	17	Desarrollada la posibilidad de añadir menús a la interfaz. Desarrollada la posibilidad de organizar el software de forma modular (múltiples interfaces)
	20	Añadido control del gráfico principal de la interfaz: <i>zoom in</i> , <i>zoom out</i> , <i>pan</i> , <i>data cursor</i> Cambios varios en interfaz
	22	Conseguida concordancia total con filtro Gaussiano del <i>NIST</i>
	25	Añadida funcionalidad de mostrar <i>Waviness</i> / <i>Roughness</i> tras aplicar el filtro Gaussiano Conseguida concordancia con filtro Gaussiano del <i>NIST</i>
	27	Añadida funcionalidad para variar <i>Height</i> y <i>Spacing discrimination</i> en parámetro <i>RSm</i> emulando <i>NIST</i>
	29	Conseguida concordancia filtro 2RC con <i>NIST</i>
	30	Filtro Gaussiano también obtenido por convolución (ya estaba desarrollado por FFT). Concordancia total con desarrollo por FFT y con la referencia del <i>NIST</i> Añadida a la interfaz gráfica posibilidad de seleccionar el método de aplicación del filtro Gaussiano de igual forma que en el <i>NIST</i> : por convolución o por FFT
Mayo	1	Añadido PSD por método <i>Mixed Radix FFT</i> Posibilidad de utilizar múltiples escalas en la representación PSD Añadidas ventanas Hann, Hamming y Blackman en módulo PSD Añadido un nuevo método de PSD: <i>Zero Padding FFT</i> Cambios en GUI. Añadidos menús que separan los distintos subcomponentes del software: <i>Parameters</i> , <i>Gaussian Filter</i> , <i>PSD</i> ... Mejorada robustez del programa

	<p>Añadido nuevo módulo: <i>Autocorrelation</i></p> <p>Implementado input del <i>NIST Lag Length</i></p> <p>2 Añadidos inputs del <i>NIST Right Side</i> y <i>Left and Right Side</i>. Adicionalmente, cargados módulos <i>Left Side</i> y <i>Biased Autocorrelation</i></p> <p>Añadidas "<i>Gaussian Windows</i>" imitando <i>NIST</i></p>
	<p>Añadido nuevo módulo: BAC</p> <p>Implementado input del <i>NIST Number of Bins</i></p> <p>Añadidas funcionalidades adicionales al módulo BAC, aparte de aquellas del <i>NIST</i></p> <p>3 Añadido <i>switch Waviness - Roughness</i> al módulo <i>Filter in the Frequency Domain</i>.</p> <p>Añadido método Recursivo al filtro 2RC</p> <p>Añadidas barras de progreso (%) en operaciones "largas" (> 2 segundos)</p>
4	Añadido Menú para exportar los ejes activos en la GUI y poder cambiar su tamaño, relación de aspecto, guardar, imprimir...
7	Corregidos bugs varios y mejorada robuste
8	<p>Añadida <i>Splash Screen</i> a nueva versión de .exe</p> <p>Corregidos bug varios</p>
18	<p>Modificaciones <i>RSm</i></p> <p>Mejorada interfaz gráfica módulo Parámetros</p> <p>Transiciones más suaves entre módulos</p>
Final de la primera etapa de desarrollo y comienzo de la segunda	
23	Fin del desarrollo de un generador de <i>.smd independiente</i> . Posible futura incorporación a <i>VisualSR2D</i> .
28	<p>Mejorado módulo de filtrado en el dominio de la frecuencia. Relación filtro definido y resultado: <i>Waviness</i> o <i>Roughness</i></p> <p>Superposición filtro sobre perfil en dominio de la frecuencia para mayor claridad</p> <p>Robustez general</p>
29	Corregido <i>bug</i> con etiqueta de segundo eje y tras utilizar el módulo de <i>filter freq. Domain</i>

Junio	1	<p>Módulo de carga de .smd completamente renovado. Lee caracteres ASCII y evalúa todos los parámetros del fichero en busca de información y errores/incompatibilidades.</p> <p>Añadido a la interfaz gráfica panel <i>data_information</i> en la esquina inferior derecha. con información sobre el .smd cargado</p> <p>Robustez en el tratamiento de ficheros</p> <p>Filtros al cargar un fichero</p> <p>Posibilidad de emplear datos relativos en el eje Z</p> <p>Unidades distintas a <i>um</i> en ambos ejes</p>
	2	<p>Implementado módulo independiente generador de .smd en <i>VisualSR2D</i>, pasando a ser el módulo <i>VisualSR2D .smd Generator</i></p> <p>Más rapidez cambiando entre módulos</p>
	3	<p>Posibilidad de exportar perfiles filtrados</p> <p><i>VisualSR2D</i> optimizado para trabajar cargando múltiples perfiles (p.ej filtrado de perfil y posterior carga de dicho perfil filtrado).</p>
	4	<p>Carga automática perfiles filtrados para su análisis de parámetros</p> <p>Diferencia entre parámetros <i>P</i>, <i>W</i> y <i>R</i></p> <p>Posibilidad de calcular parámetros sobre longitud de evaluación o básica</p> <p>Búsqueda en el fichero de la longitud básica en caso de que haya sido filtrado, y de si es de rugosidad u ondulación. Si tiene longitud básica pero esto último no está especificado se pregunta al usuario.</p> <p>Mejorada interfaz gráfica módulo parámetros con más información relativa a longitud de referencia</p> <p>Corrección de errores y mejoras varias</p> <p>Robustez</p>
	9	Robustez
	14	<p>Correcciones menores</p> <p>Robustez</p>
	24	Mejoras en la gestión de errores durante la carga de un archivo
	30	<i>Error handling</i> en múltiples submódulos

4.2 IMPLEMENTACIÓN Y DISTRIBUCIÓN

VisualSR2D está desarrollado en MATLAB. Existen tres ficheros de código principales, *VisualSR2D.m*, *VisualSR2D_smd_generator.m* y *export_filtered_profile.m*, además de varias funciones de soporte, en general de pocas decenas de líneas. El conjunto del programa final suma más de 5000 líneas, si bien este número todavía aumenta en un par de miles si se consideran también los ficheros de prueba fueron generándose a lo largo del desarrollo, y que obviamente juegan ningún papel relevante en la versión final del programa.

La función de estos ficheros de código *.m* principales es la siguiente:

- *VisualSR2D.m*: Con una longitud de 3500 líneas, este es sin duda el núcleo del programa. Incorpora todos los procesos de cálculo relativos a las herramientas de análisis que serán descritas en el *Capítulo 5: Base Teórica de las Herramientas de Análisis de VisualSR2D*, así como todo el desarrollo de la interfaz gráfica del programa.

Dentro de *VisualSR2D.m* destaca con más de 850 líneas el módulo de carga del programa, que en definitiva supone el tratamiento de ficheros que *VisualSR2D* hace de acuerdo a la Norma ISO 5346-2, poniéndose así de manifiesto la importancia de la Norma en el programa.

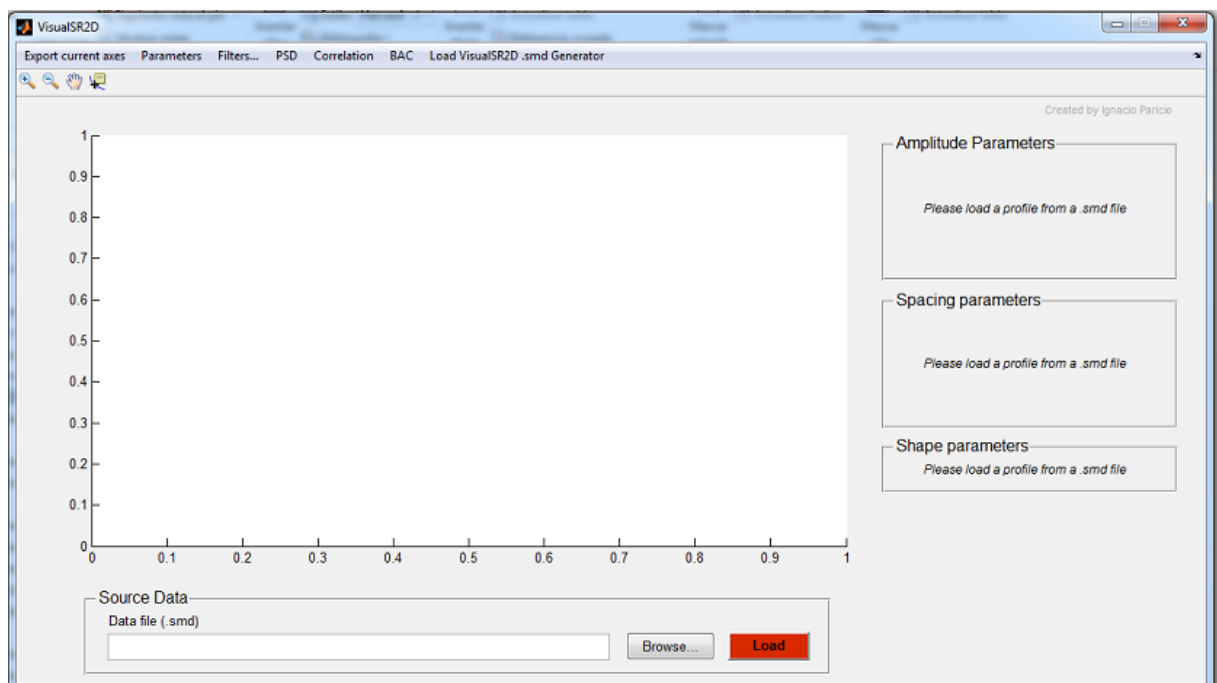


Figura 28. Vista general de la interfaz de *VisualSR2D* al abrir el programa

- *VisualSR2D_smd_generator.m*: Es llamado desde la interfaz gráfica general (véase figura 29), y consiste en un módulo de generación de archivos *.smd* y en su interfaz gráfica asociada. Es completamente independiente del análisis que esté realizándose en *VisualSR2D*, y puede ser llamado desde el mismo en cualquier momento sin necesidad de acción previa.

Al igual que el módulo de carga, con el que comparte de forma aproximada número de líneas, esta herramienta supone una aplicación directa de la Norma. Su interfaz gráfica está organizada en tres ventanas, de forma similar a la división que hace la Norma ISO 5436-2 de los registros de un fichero *.smd* (aquí obviamente el cuarto registro, *checksum*, es omitido ya que se calcula automáticamente).

VisualSR2D .smd Generator

Created by Ignacio Paricio

Header

Revision Number ISO 5436-2:2001	File Identifier
Feature Type PRF	Feature Number 0
Feature Name ISO5436	Number of Points
X Axis Type I	Z Axis Type A
X Units um	Z Units um
X Scale Factor 1.0e0	Z Scale Factor 1.0e0
X Axis Data Type D	Z Axis Data Type D
X Incremental Value 	

< Back Next >

Figura 29. Ventana de *VisualSR2D .smd Generator* relativa al Registro 1 – Cabecera de la Norma ISO 5436-2

VisualSR2D .smd Generator
Created by Ignacio Paricio

Other information (optional)

Date <input type="text" value="17 June 2014"/>	Time <input type="text" value="18:42"/>
Created by <input type="text" value="VisualSR2D"/>	Instrument ID <input type="text"/>
Instrument Serial <input type="text"/>	Last Adjustment <input type="text"/>
Probing System <input type="text"/>	
Comment <input type="text"/>	
Offset (mm) <input type="text"/>	Speed (mm/s) <input type="text"/>
Profile Filter <input type="text"/> ?	Parameter Value <input type="text"/>

< Back Next >

Figura 30. Ventana de VisualSR2D .smd Generator relativa al Registro 2 – Otra Información (opcional y no obligatoria) de la Norma ISO 5436-2

VisualSR2D .smd Generator
Created by Ignacio Paricio

Data

Z axis of the profile (one element per row):

Reset data

< Back Finish

Figura 31. Ventana de VisualSR2D .smd Generator relativa al Registro 2 – Datos de la Norma ISO 5436-2 (adaptada para este texto)

- *export_filtered_profile.m*: Este fichero de aproximadamente 200 líneas es llamado por *VisualSR2D.m* cuando el usuario quiere exportar un perfil previa aplicación de uno de los filtros que ofrece el programa: FFT (filtrado en el dominio de la frecuencia), Gaussiano o 2RC.

Al ser ejecutado este módulo crea en el directorio actual un nuevo fichero *.smd* con toda la información relativa al perfil filtrado.

Su finalidad no obstante, aparte de como herramienta de información, es también interna, pues una vez exportado el perfil el programa principal preguntará al usuario si quiere analizarlo y, en caso afirmativo, dicho perfil será cargado. De esta forma esta herramienta supone un nexo entre el módulo de filtrado y todos los demás, siendo la conexión entre filtrado y cálculo paramétrico la más importante que esta subfunción ofrece.

Más información acerca de cómo funciona realmente este módulo, la información que incluye en el fichero *.smd* resultante, o su utilidad de cara al análisis paramétrico puede encontrarse en *5.3.5 Implementación del módulo Filtrado en el Dominio de la Frecuencia y el módulo de exportación de perfiles filtrados en VisualSR2D*.

En cuanto a la distribución del programa, el planteamiento desde el principio fue que *VisualSR2D* pudiera exportarse como un archivo ejecutable *.exe*, de forma que fuera posible su distribución a usuarios que no tuvieran MATLAB.

No obstante, y debido a las peculiaridades propias de compilar código escrito en MATLAB, el archivo *.exe* resultante no puede funcionar si *MATLAB Compiler Runtime (MCR)* no está instalado en el equipo en el que pretende ejecutarse *VisualSR2D.exe*.

MATLAB Compiler Runtime es un conjunto independiente de bibliotecas compartidas que permite la ejecución de aplicaciones o componentes de MATLAB compilados en ordenadores que no tienen instalado MATLAB (Mathworks, 2014). Cuando se utilizan conjuntamente, MATLAB, *MATLAB Compiler* y *MCR* permiten crear y distribuir aplicaciones numéricas o componentes de software de forma rápida y segura.

MCR ocupa aproximadamente *550MB*, si bien la alternativa utilizada durante el compilado de *VisualSR2D* es que el instalador resultante conecte con el servidor de *Mathworks*, empresa creadora de MATLAB y todos sus productos asociados, y descargue automáticamente la versión más apropiada de *MCR* en el equipo en cuestión. Si *MCR* ya está instalado en dicho equipo este paso se omitirá.

Esta solución hace posible mantener el tamaño del fichero instalador de *VisualSR2D* por debajo de los *8MB*, facilitando de esta forma la distribución del

mismo. *MCR* también puede ser embebido dentro del instalador del programa, pero en este caso el tamaño total del fichero sería la suma de ambos *MCR* y *VisualSR2D*, lo que se ha considerado como una solución menos práctica.

Aunque la alternativa anterior es la utilizada hasta la fecha, también pueden crearse archivos *.exe* de *VisualSR2D* que puedan ser ejecutados directamente sin ser instalados. Esto, por la mayor rapidez y facilidad de uso, puede suponer una ventaja para usuarios que ya tengan instalado *MCR*, pero hace que aquellos que no tengan *MCR* en su equipo no puedan utilizar el programa.

Adicionalmente, *VisualSR2D* puede compilarse haciéndolo óptimo para su ejecución en ordenadores con sistema operativo de 64 bits, si bien estas versiones no serán compatibles con los de 32 bits.

Considerando todo lo anterior, se concluye que hay hasta 8 versiones distintas del programa una vez compilado, si bien actualmente el número se reduce a 2, pues únicamente se hace uso de aquellas con instalables con *MCR* descargable desde servidor, versiones tanto de 32 como de 64 bits.

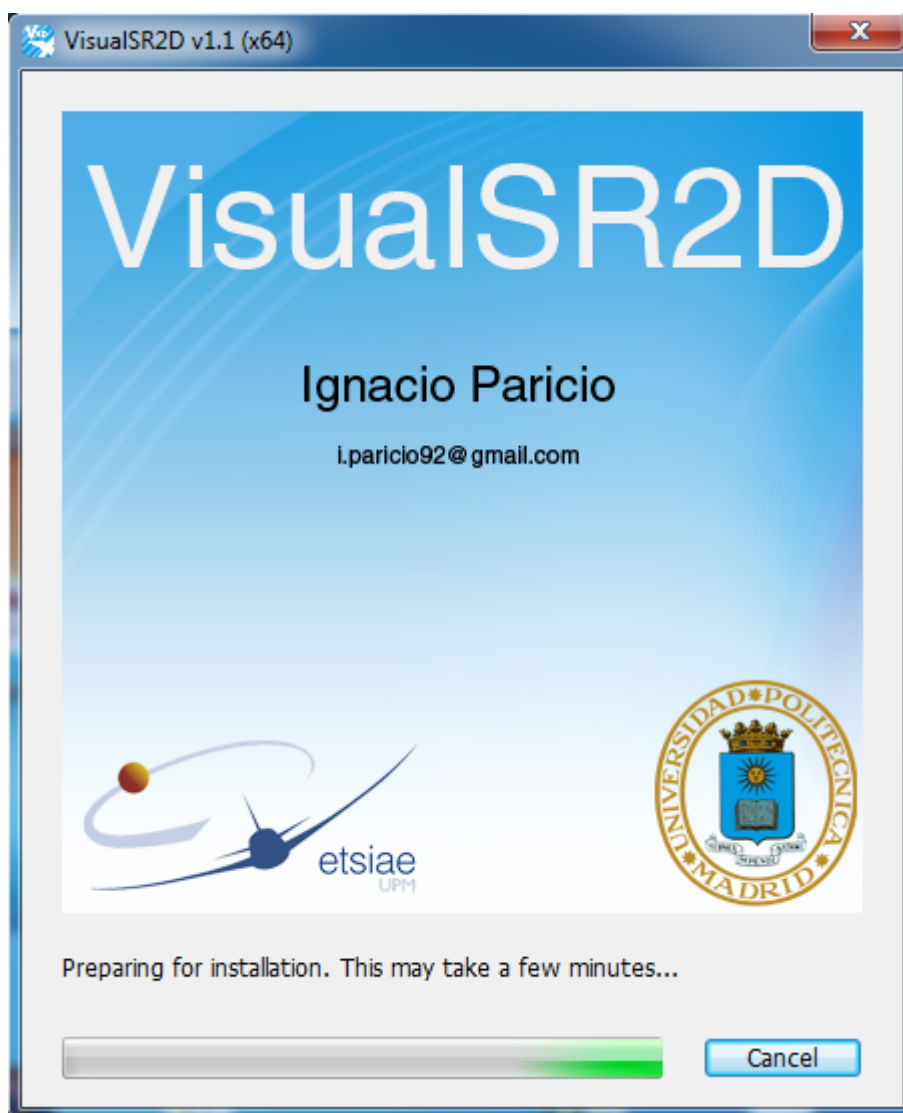


Figura 32. Ventana de inicio de instalación de *VisualSR2D*, versión de 64 bits

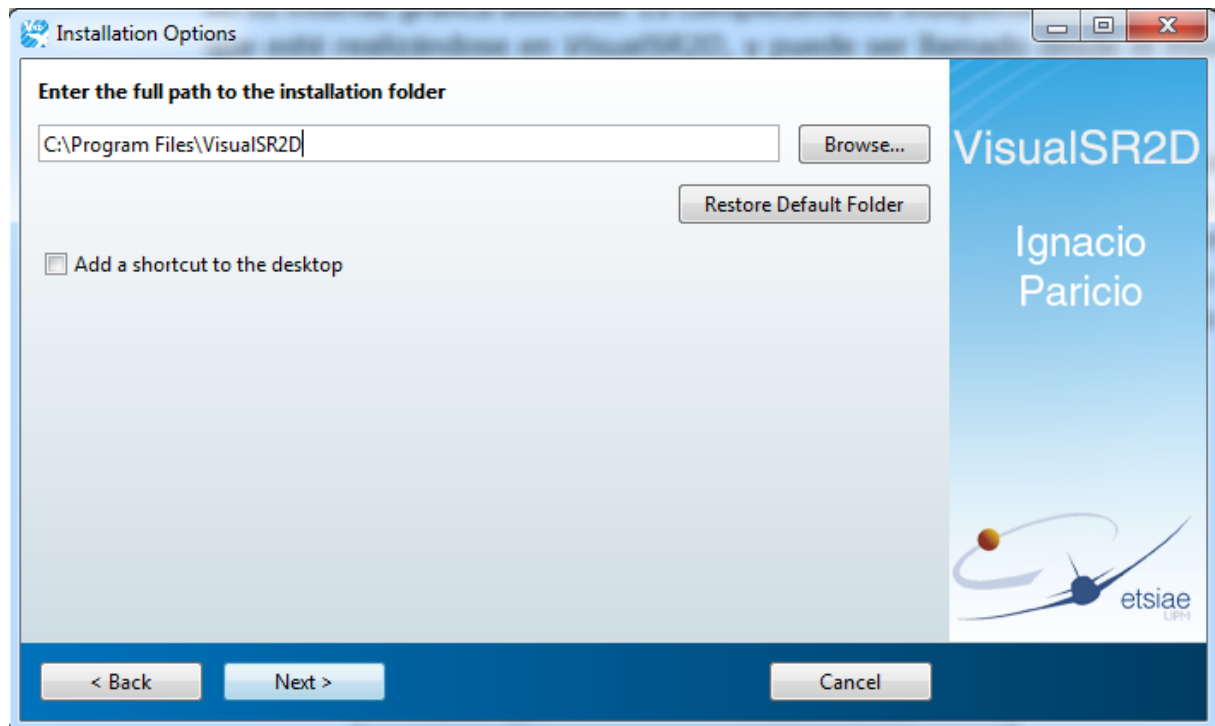


Figura 33. Instalación de VisualSR2D

4.3 APLICACIÓN DE LA NORMA ISO 5436-2 EN *VISUALSR2D*

Como se dijo en 4.1.2 *Segunda etapa: Aplicación de la Norma ISO 5436-2*, *VisualSR2D* hace aplicación de la Norma ISO 5436-2 en la carga de ficheros, la exportación de perfiles filtrados, o en *VisualSR2D .smd Generator*.

4.3.1 Carga de archivos *.smd* en *VisualSR2D*

Ya se indicó en 4.1 *Introducción, Filosofía y Etapas en el Desarrollo de VisualSR2D* que el módulo de carga de ficheros en *VisualSR2D* por si solo tiene un peso importante en el conjunto del programa.

Dentro de este módulo de carga de archivos, aquellas operaciones relacionadas con la aplicación de la Norma son:

- A la hora de buscar un archivo para cargar en el programa, *VisualSR2D* muestra solo aquellos con extensión *.smd*. No obstante, el programa realiza una comprobación de que el fichero seleccionado realmente tiene extensión *.smd*. En caso negativo el programa muestra un mensaje de error y se detiene.

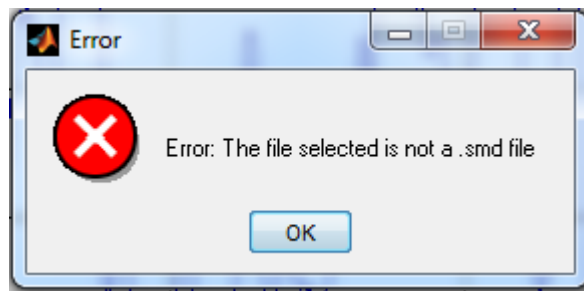


Figura 34. Error en VisualSR2D al intentar cargar un fichero con extensión distinta a .smd

- **Análisis de la estructura del fichero:** deben existir cuatro registros con cuatro caracteres ASCII de final de sección, <ETX>. Si este no es el caso el programa advierte al usuario y sugiere cancelar la ejecución. No obstante el usuario puede elegir seguir adelante, lo que podría derivar en errores, si bien estos no tienen por qué ser críticos. Por ejemplo, la falta del carácter <ETX> tras el registro 4 (*checksum*) derivaría en el error descrito dos puntos más abajo, que a su vez produciría un fallo en la lectura del *checksum*, pero podría los datos seguirían siendo analizados.

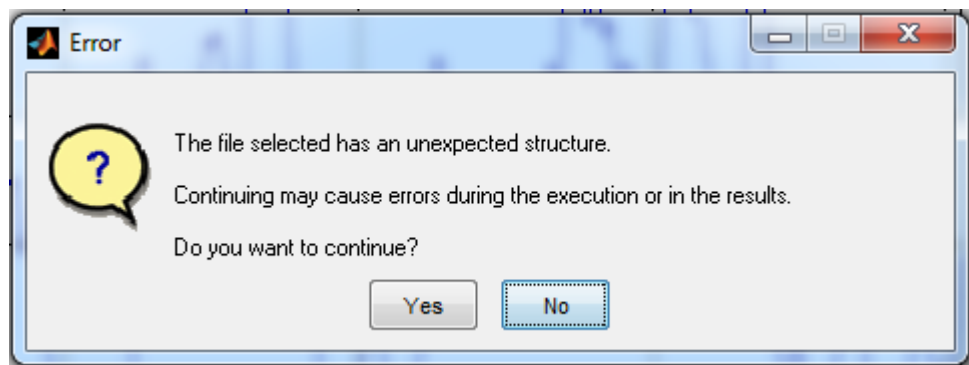


Figura 35. Comportamiento de VisualSR2D tras detectar una estructura errónea

- **Conteo del número de líneas del primer registro.** Como quedó establecido en 2.4.1 *Registro 1 – Cabecera* para análisis de datos 2D, que son con los que *VisualSR2D* trabaja, éste debe tener cuatro líneas. Si la cabecera no contiene cuatro líneas el programa avisa al usuario, sugiriendo que el hecho de que pueda estar siendo seleccionado un fichero con datos en tres dimensiones puede ser el problema. Aunque en este caso también se permite que el código continúe ejecutándose tras esta discrepancia, la realidad es que la probabilidad de que se produzca un error que impida la carga del archivo es extremadamente alta.

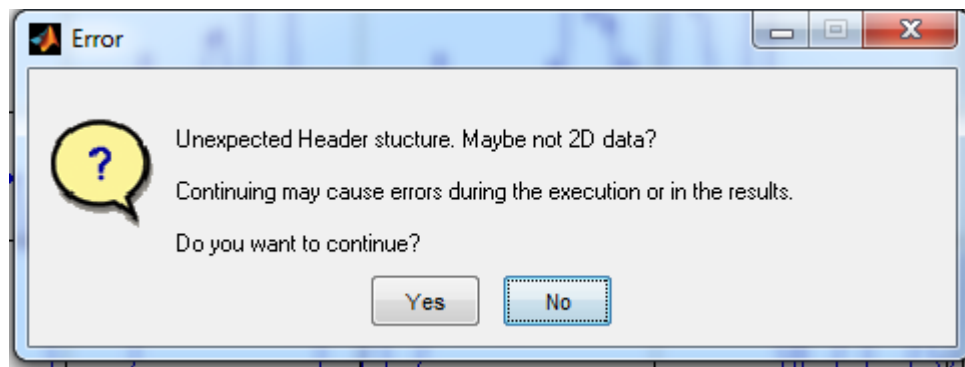


Figura 36. VisualSR2D tras detectar un encabezado con un número de líneas diferente a 4

- Comprobación de la estructura del *checksum*. De nuevo si no es correcta se permite seguir adelante con la carga del fichero, previa notificación y consulta al usuario.
- Comprobación del *checksum*. En este caso el programa realiza su propio cálculo del *checksum* del fichero basado en los registros 1, 2 y 3 tal y como se explicó en 2.4.4 Registro 4 – Suma de verificación: Checksum, y compara este valor con el del fichero. Si ambos valores no coinciden, VisualSR2D muestra un mensaje con el *checksum* que tiene fichero y el *checksum* que debería tener el fichero.

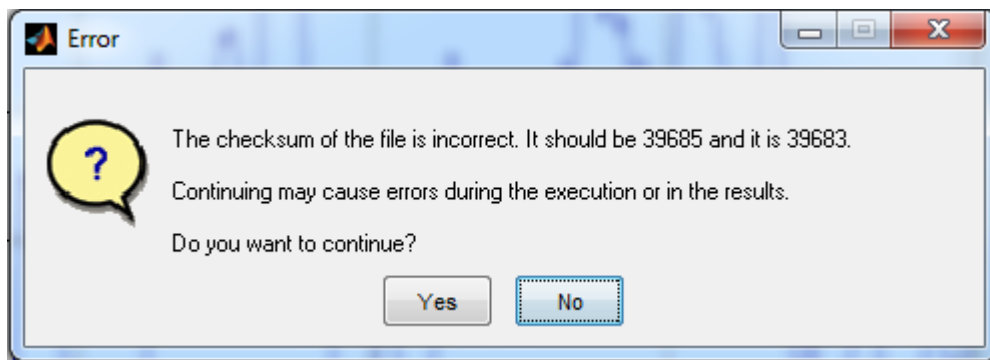


Figura 37. Notificación de checksum incorrecto e indicación del calculado por el programa

- Análisis del Registro 1 – Cabecera. Se realiza una comprobación y almacenado en la memoria del programa de cada uno de los elementos que forman el Registro 1. Entre las comprobaciones realizadas destacan:
 - Número de versión (*The_revision_number*): Si es distinto a ISO 5436 advierte al usuario de que los resultados obtenidos con el programa pueden no ser los esperados, ya que VisualSR2D trabaja con dicha norma.

- Tipo de elemento geométrico (*Feature_type*): Si es una superficie ('SUR') el programa advierte al usuario y se detiene, ya que no está preparado para trabajar con datos tridimensionales.
 - Número de elemento geométrico (*Feature_number*): Debe ser un entero sin signo.
 - Tipo del eje (*Axis_type*): El eje X debe ser de tipo incremental.
 - Número de puntos (*Number_of_points*): Debe ser el mismo para ambos ejes X y Z.
 - Unidades (*Units*): Debe ser para ambos ejes *mm* o μm , unidades soportadas por *VisualSR2D*.
- Análisis del Registro 2 – Otra información (opcional y no obligatoria). En este caso no se almacenan en el programa los valores bajo todas las etiquetas de este registro, que además son ilimitados por permitir la norma la inclusión de etiquetas personalizadas.

La lectura de información queda limitada, en caso de que existan, a los campos de fecha de creación, autor y filtro del perfil. El análisis de datos es únicamente destacable para en este último caso.

En primer lugar *VisualSR2D* intenta localizar la etiqueta *Lc*, que de acuerdo a la Norma representa la longitud de onda de corte entre rugosidad y ondulación, parámetro de gran importancia para el análisis de acabos superficiales.

Localizado *Lc*, el programa buscará el valor asignado a dicho parámetro. En caso de no encontrarse informará al usuario, dado que la no existencia de un valor de *Lc* (o del campo opcional *PROFILE_FILTER* en general) hace que ciertas funciones del programa no estén disponibles, como se explica en *5.1.5 Implementación del Módulo Parámetros en VisualSR2D*, donde puede encontrarse más información sobre el análisis del campo *PROFILE_FILTER*.

Finalmente, *VisualSR2D* busca por un lado información sobre el tipo de filtro utilizado (Gaussiano, 2RC etc...) y por otro sobre el tipo de perfil obtenido tras aplicar dicho filtro, *waviness* (ondulación) o *roughness* (rugosidad).

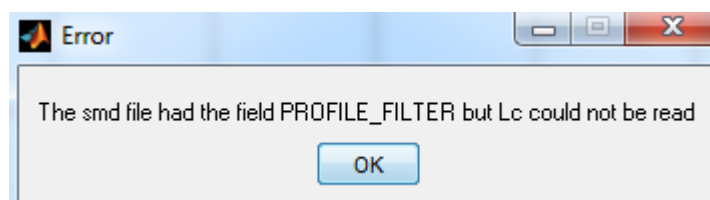


Figura 38. Campo *PROFILE_FILTER* detectado por *VisualSR2D* pero *Lc* no encontrado

En caso de no encontrarse esta información se pregunta al usuario si la conoce, si bien esta información no es tan importante como el conocimiento del valor de L_c y el carecer de ella no limita las posibilidades del programa.

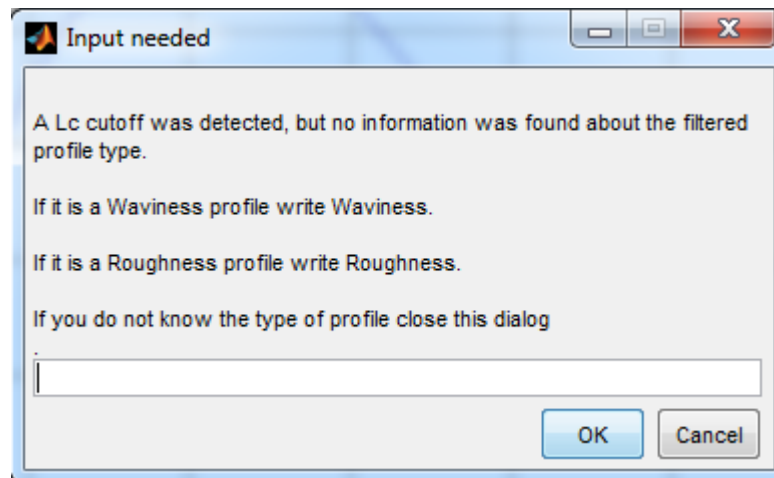


Figura 39. Valor de L_c leído pero tipo de perfil obtenido para el filtrado no encontrado

- Análisis del Registro 3 – Datos. *VisuaSR2D* lee todos los valores de las ordenadas del perfil, y si su número no concuerda con el establecido en el Registro 1 – Cabecera notifica al usuario.

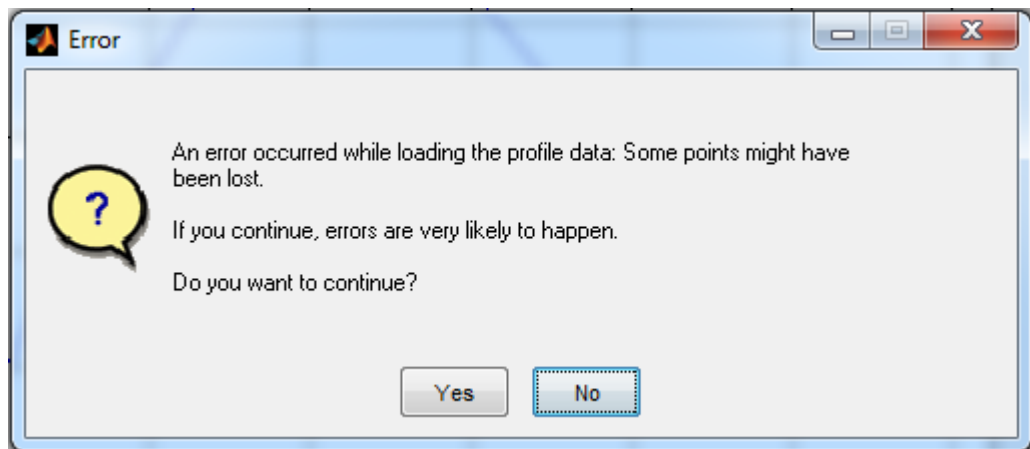


Figura 40. Notificación al usuario si ha habido una pérdida de datos en el registro 3 del perfil

- Finalmente, *VisuaSR2D* realiza operaciones para estandarizar los datos dentro del propio programa, entre las que destacan:
 - Conversión de los valores del eje Z a una escala absoluta en caso de que estén en relativa o incremental.
 - Conversión del eje Z a unidades de μm .
 - Conversión del eje X a mm .

- Aplicación de los factores de escala a ambos ejes.

4.3.2 *VisualSR2D .smd Generator*

Esta herramienta independiente de *VisualSR2D* tiene como objetivo facilitar la creación de ficheros estandarizados.

Se presenta al usuario como una interfaz gráfica con un menú de navegación entre tres ventanas distintas (véanse las figuras 29, 30 y 31), correspondientes a los registros 1, 2 y 3 respectivamente.

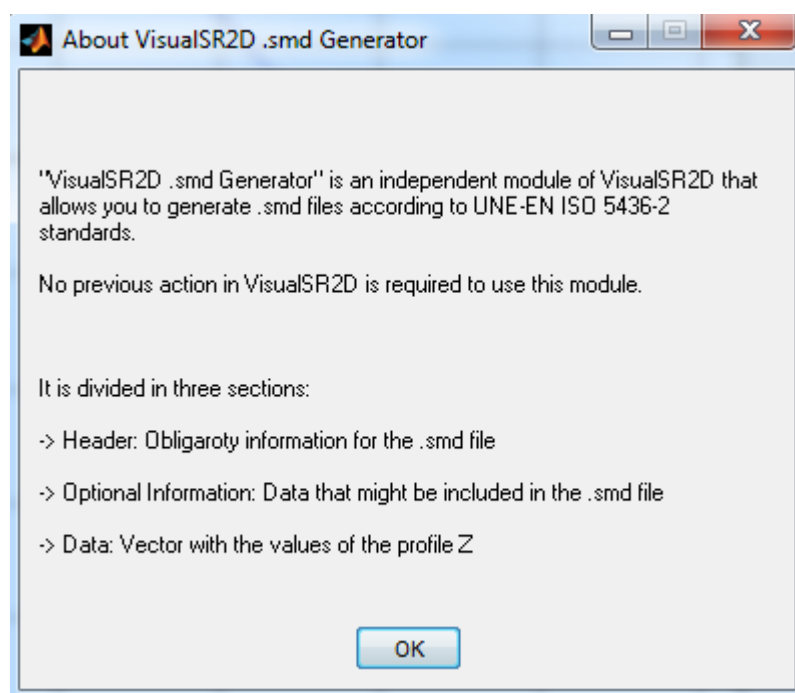


Figura 41. Mensaje informativo al acceder a *VisualSR2D .smd Generator*

Este generador de archivos *.smd* acordes a la norma ofrece también ayudas visuales en forma de mensajes emergentes al usuario, proporcionando información sobre un determinado campo al pasar el ratón por encima.

Durante la definición del fichero existen campos de escritura libre, entre los que se incluyen todos del Registro 2 – Otra información (opcional y no obligatoria) y algunos del Registro 1 – Cabecera.

En este último caso quedan a la total elección del usuario los campos *File Identifier* (identificador del fichero), *Number of Points* (número de puntos) y *X Axis Incremental Value* (valor incremental del eje X), mientras que para el resto de campos libres se proporcionan valores de referencia que se recomienda no modificar, bien sea por coherencia con el propio software (campos *Revision Number* o *Feature Name*) o por comodidad en la interpretación (*Scale factor*).

Es condición necesaria para la generación del fichero que todos los campos de escritura libre del encabezado hayan sido cumplimentados.

La última ventana de este generador, en la que se introducen los valores de las ordenadas del perfil, requiere mención especial. Estos valores deben introducirse uno en cada línea, y utilizando puntos [.] como separador decimal. Puede utilizarse cualquiera de las notaciones que recoge la Norma, a saber:

- Entero
- Entero largo
- Coma flotante en simple precisión
- Coma flotante en doble precisión

También es condición necesaria para poder crear el archivo *.smd* que el número de puntos introducidos coincida con el especificado en la primera ventana.

Una vez introducida toda la información y cumplidas las dos condiciones anteriormente descritas, *VisualSR2D .smd Generator* organiza toda la información de la forma descrita en 2.4 *Registros del Fichero .smd de Acuerdo a la Norma*, añadiendo los caracteres ASCII definidos en dicho apartado y calculando el *checksum*, por lo que el resultado es un fichero listo para ser utilizado en cualquier software de referencia.

4.3.3 Módulo de exportación de perfiles filtrados

Puede considerarse como un caso particular de *VisualSR2D .smd Generator* en el que no es necesario que el usuario introduzca ningún tipo de entrada al programa, ya que éste asigna de forma automática valores a todos los campos.

Debido a las implicaciones que este módulo tiene en *VisualSR2D*, y a su relación con otros módulos y funciones del programa que todavía no han sido tratadas, se considera conveniente retrasar su análisis, que es efectuado tras el estudio del primer módulo de filtrado, concretamente en 5.3.5 *Implementación del módulo Filtrado en el Dominio de la Frecuencia y el módulo de exportación de perfiles filtrados en VisualSR2D*

4.3.4 Comentarios acerca del enfoque de aplicación de la Norma ISO 5436-2 en VisualSR2D

Durante el desarrollo de *VisualSR2D* se ha realizado una aplicación de la Norma rigurosa, pero flexible. Esto quiere decir que si bien toda la información es tratada punto a punto tal y como se describe en la Norma, la no conformidad con la misma, especialmente en la carga de un perfil, no supone un rechazo directo del mismo.

En su lugar, la filosofía seguida es informar al usuario de la discrepancia con la norma encontrada y ofrecerle la posibilidad de continuar con la ejecución, si bien se advierte que es muy probable que en estos casos puedan producirse errores durante la ejecución o en los resultados.

Este enfoque contrasta con el utilizado por el *NIST* o por el *PTB*, en el que el tratamiento es completamente rígido, hasta el punto de que para poder realizar un análisis completo del desarrollo de la Norma que hace este último ha tenido que solicitarse directamente al *PTB* un fichero *.smd* compatible con sus sistema, al no poder cargarse en el mismo ficheros *.smd* estándar (obtenidos del *NIST* y del *NPL*), lo cual ha imposibilitado durante gran parte del desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado la utilización de su software, puesto que tampoco se informaba al usuario sobre la causa de dicho error o cómo proceder para evitarlo.

Adicionalmente, ya se ha comentado también que por ejemplo el campo *The_Revision_Number* (número de revisión) debe ser "5436 – 1999" para que el *NIST* acepte un fichero. En caso contrario, su algoritmo devolverá al usuario a la página principal sin mostrar cambios ni información acerca de la razón para el rechazo del archivo al usuario.

Desde este punto de vista, *VisualSR2D* hace un tratamiento de la Norma que se acerca más al enfoque del software del *NPL*, *Softgauges*, por un lado ofreciendo un generador de ficheros estandarizados (que en *VisualSR2D* ofrece muchas más posibilidades al usuario) y por otro haciendo un tratamiento más flexible de la Norma.

Por otra parte, la filosofía seguida durante la creación de *VisualSR2D* está también orientada a la compatibilidad con otros softwares de referencia. Ya se ha hecho referencia en múltiples ocasiones los problemas al intentar utilizar de forma combinada los algoritmos de las tres referencias analizadas en este trabajo, siendo dos ejemplos representativos los que acaban de ser presentados.

Es por esto que la forma de trabajo en *VisualSR2D* es totalmente novedosa respecto a la del *NIST* o en *NPL*. Mientras que estos últimos realizan de forma interna las operaciones de filtrado y análisis de parámetros, en *VisualSR2D* se *deja huella* en un fichero *.smd* de la operación de filtrado realizada, de forma que este mismo análisis podría ser llevado a cabo en múltiples algoritmos.

Esta es la razón por la que el campo de información opcional *PROFILE_FILTER* resulta de gran importancia para el programa, pues supone la vía de comunicación tanto externa como interna para el análisis paramétrico de perfiles filtrados.

Capítulo 5. BASE TEÓRICA DE LAS HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS DE VISUALSR2D

5.1 PARAMETRIZACIÓN

5.1.1 Introducción

La finalidad de definir parámetros es poder extraer información relevante del perfil de forma concisa e inequívoca. Cuantificar una superficie no solo permite realizar clasificaciones, sino también poder asociar los parámetros obtenidos con la funcionalidad de la pieza.

De acuerdo con la actual terminología (ISO), el concepto de calidad superficial engloba rugosidad, ondulación y perfil primario. La designación a la hora de referirse a un parámetro es tal que la primera letra indica el perfil bajo evaluación:

- *Rx* proviene de *Roughness*: se considera un perfil de rugosidad.
- *Wx* indicaría *Waviness*, y sería la un perfil de ondulación el que estaría siendo evaluado.
- *Px* hace referencia al perfil primario.

En las subsiguientes secciones se presentan aquellos parámetros 2D incluidos en el software *VisualSR2D*. Éstos se limitan a parámetros ISO, pues con ellos se cubre de forma adecuada toda aquella información que puede ser cuantificada en un perfil bidimensional, y quedan definidos en la normativa *UNE-EN ISO 8785:2000 Especificación geométrica de productos (GPS). Imperfecciones superficiales. Términos, definiciones y parámetros*.

Tabla 12 Clasificación de los parámetros estudiados de acuerdo a las categorías mencionadas.

Categoría	Parámetro(s)		
Amplitud	<i>Ra</i>	<i>Wa</i>	<i>Pa</i>
	<i>Rq</i>	<i>Wq</i>	<i>Pq</i>
	<i>Rp</i>	<i>Wp</i>	<i>Pp</i>
	<i>Rt</i>	<i>Wt</i>	<i>Pt</i>
	<i>Rv</i>	<i>Wv</i>	<i>Pv</i>
	<i>Rz</i>	<i>Wz</i>	<i>Pz</i>
Espaciado	<i>RSm</i>	<i>Wsm</i>	<i>PSm</i>
Forma	<i>Rsk</i>	<i>Wsk</i>	<i>Psk</i>
	<i>Rku</i>	<i>Wku</i>	<i>Pku</i>

Los parámetros a considerar pueden clasificarse según sean de amplitud, espaciado o forma de acuerdo a la tabla 12.

En lo que sigue y sin pérdida de generalidad se utiliza para definir los parámetros nomenclatura de perfil de rugosidad, es decir, se emplean como nombres representativos los de la primera columna de la tabla 12. Las definiciones en ondulación y perfil primario para el estudio de otro tipo de perfiles son análogas excepto en el caso de $Rz/Wz/Pz$, que será analizado en detalle.

El hecho de utilizar los parámetros de rugosidad y no otros viene propiciado porque los primeros son los más representativos del acabado superficial de una pieza (Czichos, et al., 2006), y en general los más extendidos en el estudio de perfiles bidimensionales.

Téngase en cuenta también que para definir dichos parámetros se considera un vector de n elementos z que contiene las ordenadas de un perfil, siendo $z(i)$ el elemento i de dicho perfil.

5.1.2 Parámetros de Amplitud

5.1.2.1 Rugosidad Media Aritmética, Ra

Es el parámetro más utilizado en la determinación numérica de calidades superficiales (Czichos, et al., 2006). Se define como la media aritmética de los valores absolutos del perfil z medidos a partir de la línea central de dicho perfil:

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z(i)|$$

5.1.2.2 Rugosidad Media Cuadrática, Rq

Se define como la media cuadrática de las ordenadas $z(i)$ de los n puntos que componen el perfil, medidos a partir de la línea central del mismo. Cuando se pretende modelar una superficie, este parámetro es generalmente preferido a Ra . Matemáticamente se expresa como:

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z(i)^2}$$

5.1.2.3 Altura del pico máximo del perfil, Rp

Distancia al punto más alto del perfil medida a partir de la línea central del mismo. Este parámetro apenas se emplea en comparación con aquellos basados en el la altura total valle-pico.

Dado que este parámetro está asociado con extremos del perfil no resulta representativo del conjunto. Adicionalmente, cuando se evalúa sobre longitudes básicas, R_p susceptible de grandes cambios entre las mismas.

5.1.2.4 *Altura del valle mínimo del perfil, R_v*

Distancia al punto más bajo del perfil medida a partir de la línea central del mismo. Nótese que al quedar definido como distancia $R_v > 0$.

De forma similar a R_p , este parámetro está basado en un valor extremo y por tanto no es representativo del perfil.

5.1.2.5 *Rugosidad total, R_t*

Se define como la distancia entre el punto más alto y el más bajo del perfil.

5.1.2.6 *Rugosidad máxima, R_z*

Se define como la media de sucesivos valores de R_{ti} , calculadas a lo largo de la longitud del perfil. R_{ti} se define a su vez como como la suma de la altura máxima de pico y la profundidad máxima de valle contenidos en la i -ésima longitud básica.

En aquellos casos en los que la longitud a considerar es la longitud de evaluación, este parámetro coincide con R_t .

En el apartado 5.1.5 *Implementación del Módulo Parámetros en VisualSR2D* se analiza en detalle cómo este parámetro y R_t se enmarcan dentro de *VisualSR2D*.

5.1.3 Parámetros de Espaciado: RS_m^*

RS_m se define como la distancia media entre los puntos de corte del perfil con la línea central, esto es, los ceros del perfil. Matemáticamente, si hay q puntos de corte entonces:

$$RS_m = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^n Sm(i)$$

Con $Sm(i)$ cada una de las distancias entre ceros consecutivos.

Nótese no obstante que no todos los ceros del perfil son válidos a la hora de calcular RS_m . Para que uno de estos puntos de corte sea considerado deben cumplirse, entre este punto y el anterior, todas y cada una de las siguientes condiciones (Muralikrishnan & Raja, 2009):

* Existen discrepancias en la definición de RS_m , como puede consultarse en (Leach & Harris, 2002)

1. Hay un pico entre ellos que supera el Umbral Superior. Este umbral está típicamente referenciado a Rz en forma de porcentaje, y de esta forma ha sido implementado en *VisualSR2D*, dejando dicho porcentaje a elección del usuario.
2. Hay un valle entre ellos que pasa por debajo del Umbral Inferior, con consideraciones análogas a la condición anterior.
3. La distancia entre dichos puntos de corte es superior a un Umbral de Espaciado. Este umbral se referencia a la longitud básica de forma similar a cómo los umbrales superior e inferior se referenciaban a Rz .
4. Entre el punto de corte en consideración y el inmediatamente siguiente al mismo debe haber un pico que cruce el Umbral Superior.

Valores típicos de los umbrales de altura (Umbral Superior y Umbral Inferior), y de espaciado son, respectivamente, $10\% Rz$ y $1\% Longitud\ básica$ (Michigan Metrology, 2010).

A continuación se desarrolla un ejemplo para comprender mejor la metodología de cálculo del parámetro RSm . Por simplicidad se va a obviar la tercera condición, suponiendo que se cumple para todos los puntos considerados.

Considérese el perfil de la figura 42. Tomando el punto 1 como referencia, se pretende determinar cuál es el siguiente punto de corte válido.

El punto 2 no cumple la segunda condición, puesto que no hay ningún valle entre ambos ceros que pase bajo el umbral inferior.

Considerando el punto 3, podría pensarse que es válido ya que las condiciones primera y segunda se cumplen entre los puntos 1 y 3. No obstante, nótese que la cuarta condición no queda satisfecha, dado que entre el punto 3 y el inmediatamente siguiente, punto 4, no se supera el umbral superior. El punto 3 por tanto no es válido y no es tenido en cuenta para el cálculo de RSm . Consideraciones análogas conducen a que el punto 4 tampoco es válido.

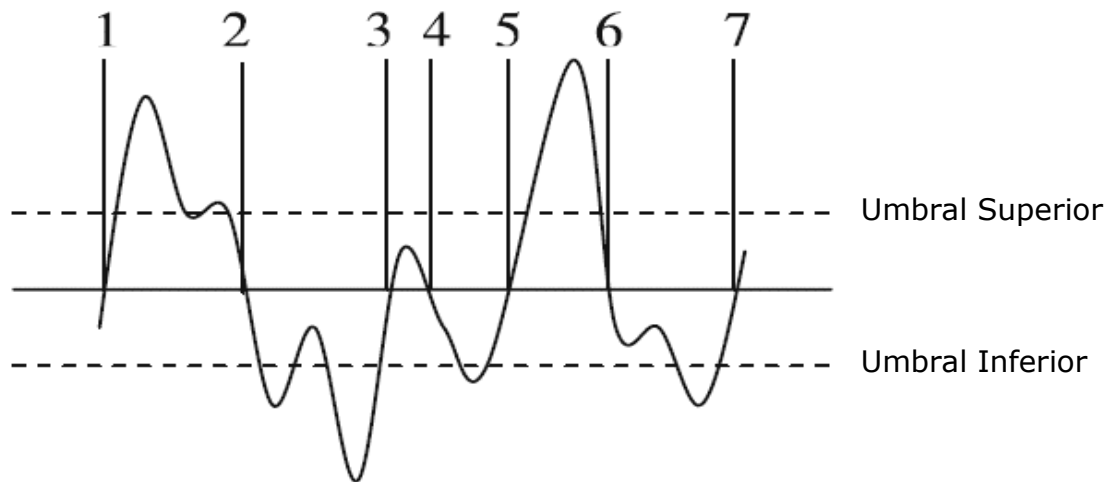


Figura 42. Perfil aleatorio en el que se muestran los umbrales de altura mencionados en la primera y segunda condición. Los puntos de corte o ceros del perfil se encuentran numerados. Adaptación (Muralikrishnan & Raja, 2009).

El punto 5 sí que satisface las condiciones primera, segunda y cuarta, y puesto que estamos considerando que siempre se cumple la tercera condición, espaciado, la distancia entre los puntos 1 y 5 pasaría a ser $Sm(1)$.

En la siguiente figura se ha añadido un nuevo punto de corte, 8, de forma que puede comprobarse que el punto 7 cumpliría todas las condiciones para ser otro cero válido, obteniendo así $Sm(2)$.

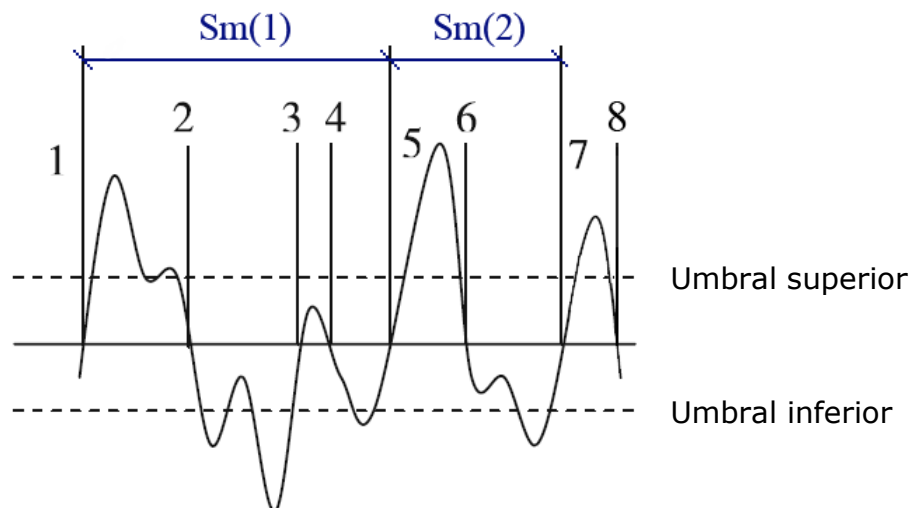


Figura 43. Distancias $Sm(1)$ y $Sm(2)$ válidas para el cómputo de RSm del perfil considerado

Una vez determinados todos los Sm_i podría calcularse RSm .

5.1.4 Parámetros de Forma^{xi}

Sea z un vector de n elementos que contiene las ordenadas de un perfil y $z(i)$ el elemento i de dicho perfil.

5.1.4.1 Factor de asimetría, Rsk

Se define como el cociente entre la media de los cubos de los valores de las ordenadas $z(i)$ y el cubo del parámetro Pq , Rq o Wq . En adelante se considera el caso con Rq sin pérdida de generalidad tal y como se quedó establecido en la introducción.

Matemáticamente:

$$Rsk = \frac{1}{nRq^3} \sum_{i=1}^n z(i)^3$$

El factor de asimetría deriva de la curva de distribución de amplitudes y representa la simetría del perfil según la línea central. Cuando la mayor parte del perfil se concentra sobre la línea central Rsk es negativo, y viceversa.

Un perfil con valor nulo de Rsk indicaría que es simétrico respecto a la línea central, distribución normal (Olympus, 2013).

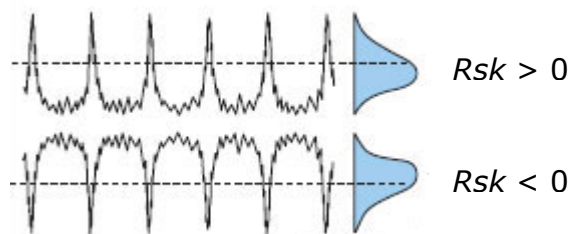


Figura 44. Representación de dos perfiles con una marcada asimetría, su distribución de amplitudes (en azul) y cómo Rsk recoge dicha asimetría. Adaptado (Olympus, 2013).

Nótese que el parámetro no distingue si los picos o valles están distribuidos uniformemente, por lo que resulta muy influenciado por grandes picos o valles aislados dado que además se evalúa el cubo de sus amplitudes.

5.1.4.2 Curtosis, Rku

El parámetro de curtosis se define como el cociente entre la media bicuadrática de las ordenadas del perfil y la potencia cuarta del parámetro Rq (o Pq o Wq):

^{xi} Nótese que los parámetros de forma aquí considerados, factor de asimetría Rsk y curtosis Rku , son adimensionales, a diferencia de los anteriormente descritos.

$$Rku = \frac{1}{nRq^4} \sum_{i=1}^n z(i)^4$$

Al contrario que el factor de asimetría previamente descrito, Rku sí detecta si los picos o valles están o no distribuidos de forma uniforme sobre la longitud básica, si bien no diferencia entre pico o valle debido a que $z(i)$ está elevado a un exponente par.

El parámetro de curtosis proporciona una idea de lo afilado que es un perfil. Valores de Rku mayores que 3 representan un perfil "*puntiagudo*" mientras que valores menores indican que el perfil no es afilado, de forma que sus desniveles tienen un carácter más "*aplanado*". De forma similar a Rsk , $Rku = 3$ indica una distribución normal (Olympus, 2013).

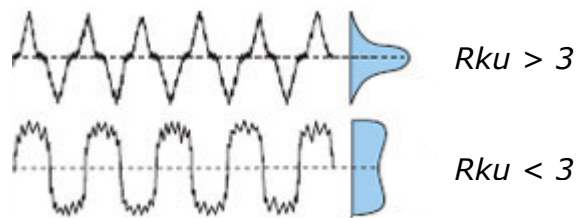


Figura 45. Representación de dos perfiles que recogen bien las variaciones de Rku y su distribución de amplitudes (en azul). Adaptado (Olympus, 2013).

Como consecuencia de esta capacidad para detectar variaciones que realmente están presentes en la superficie real de una pieza, Rku es un parámetro muy útil en la predicción del comportamiento de componentes en servicio, dado que permite estimar la retención de lubricante y por tanto el desgaste de las piezas (Smith, 2002).

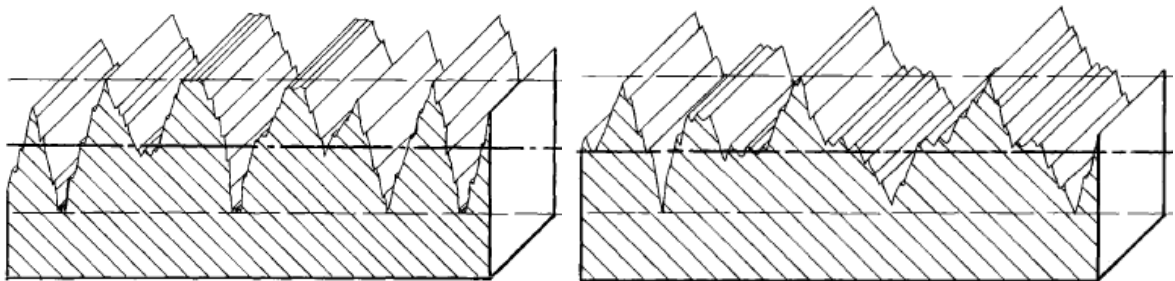


Figura 46. Izquierda: Perfil con desniveles relativamente planos y valor $Rku < 3$. Derecha: Perfil con picos y valles pronunciados, $Rku > 3$

5.1.5 Implementación del Módulo Parámetros en VisualSR2D

El módulo de cálculo de parámetros de *VisualSR2D* supone por defecto que está tratando con un perfil primario, y por tanto los parámetros proporcionados son P_a , P_q , P_v etc..., calculados sobre la longitud de evaluación.

Con esta consideración, el valor de P_t que la interfaz muestra es análogo a P_z , ya que en un perfil primario, esto es, sin filtrado, no hay definida una longitud básica sobre la que calcular los diversos P_{ti} , de cuya ponderación resulta P_z .

No obstante, si *VisualSR2D* detecta que el perfil cargado ha sido filtrado, el comportamiento del programa es distinto.

Para realizar esta detección, en primer lugar, *VisualSR2D* busca en el archivo .smd en consideración información contenida bajo la etiqueta *PROFILE_FILTER*, línea opcional de un fichero .smd tal y como se describe en la Norma ISO 5436-2. La estructura típica de esta línea es:

PROFILE_FILTER <nombre del filtro> Lc <valor de Lc>

o bien (nótese la diferencia en el espaciado tras Lc)

PROFILE_FILTER <nombre del filtro> Lc<valor de Lc>

Un ejemplo típico para un filtro Gaussiano podría ser:

PROFILE_FILTER Gaussian Lc 0.08

El primer formato está más extendido, pese a ser el segundo el que de forma rigurosa aparece en la Norma ISO 5436-2. *VisualSR2D* puede trabajar con ambos formatos.

Una vez recogida la información sobre Lc, que define la longitud básica de perfil, *VisualSR2D* busca también información sobre si está evaluándose un perfil de ondulación o de rugosidad. Se recomienda incluir esta información en el identificador del fichero o en el nombre del mismo, tal y como hacen tanto el *NIST* como el módulo de exportación de *VisualSR2D*. La razón es que la Norma ISO 5436-2 no da opción a incluir dicho campo en la línea *PROFILE_FILTER*.

Así por ejemplo tras aplicar un filtro Gaussiano a un perfil contenido en *miperfil.smd* para obtener un perfil de ondulación, se recomienda cambiar su identificador a *miperfil waviness* o cambiar el nombre del archivo a *miperfil_waviness.smd*.

Si *VisualSR2D* encuentra un valor de Lc pero no encuentra información sobre el tipo de perfil que bajo evaluación, preguntará al usuario si es la rugosidad o la ondulación la que está siendo considerada. En caso de no recibir respuesta el perfil

será tratado como un perfil primario, con la salvedad de que en este caso, al conocer la longitud básica supuesta igual a L_c , podrán definirse parámetros a basados en la misma. En este caso, por tanto, sí que pueden definirse ambos parámetros P_z y P_t . Si el usuario elige calcular los parámetros sobre la longitud de evaluación, *VisualSR2D* mostrará el valor de P_t , que será idéntico a P_z . Por otro lado, si la casilla de cálculo sobre la longitud básica es marcada (ver figura 47), *VisualSR2D* mostrará el valor de P_z como ponderación de los distintos P_{ti} calculados en cada una de las longitudes básicas.

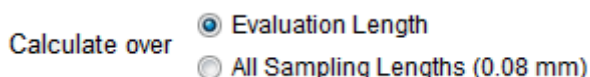


Figura 47. Selección de longitud de referencia para el cálculo de parámetros en *VisualSR2D*, habiendo detectado una longitud básica de 0.08mm.

En resumen, cuando un valor de L_c que permita definir una longitud básica es detectado, los parámetros $R_z/W_z/P_z$ pueden ser calculados con rigor a partir de los $R_{ti}/W_{zi}/P_{zi}$.

Finalmente, destacar que todo lo aquí descrito está en línea con el módulo de exportación de perfiles filtrados que *VisualSR2D* incorpora, y que será descrito en el próximo capítulo. De esta forma, si se carga un perfil en el programa, se filtra y se exporta, automáticamente se creará la línea PROFILE_FILTER con los datos y parámetros del filtro utilizado, y se cambiarán tanto el nombre como el identificador del archivo añadiendo información sobre el tipo de perfil obtenido en el filtrado (rugosidad u ondulación).

5.1.6 Comparativa de Resultados del Módulo Parámetros con el *NIST*, Algoritmo de Referencia

A continuación se muestra una comparativa entre los parámetros obtenidos de acuerdo al algoritmo del *NIST* y a *VisualSR2D* para el perfil *EDM.smd*, que puede encontrarse en el directorio \Base de datos 2D\Base de datos *NIST* del CD adjunto o en <http://physics.NIST.gov/VSC/jsp/Database.jsp>. Información sobre este perfil se muestra en la figura 48, y la representación del perfil en la figura 49.

EDM.smd corresponde a un perfil primario, y por tanto estos parámetros son calculados sobre la longitud de evaluación, tanto en el *NIST* como en *VisualSR2D*.

Este perfil será utilizado los restantes apartados como comparación de resultados de los diversos módulos de *VisualSR2D*.

Data information	
File Identifier:	EDM
Revision Number:	ISO 5436 - 1999
Number of Points:	22401
Created by:	NIST Virtual Surface Calibration
Date:	6 January 2009

Figura 48. Perfil *EDM.smd* en *VisualSR2D*

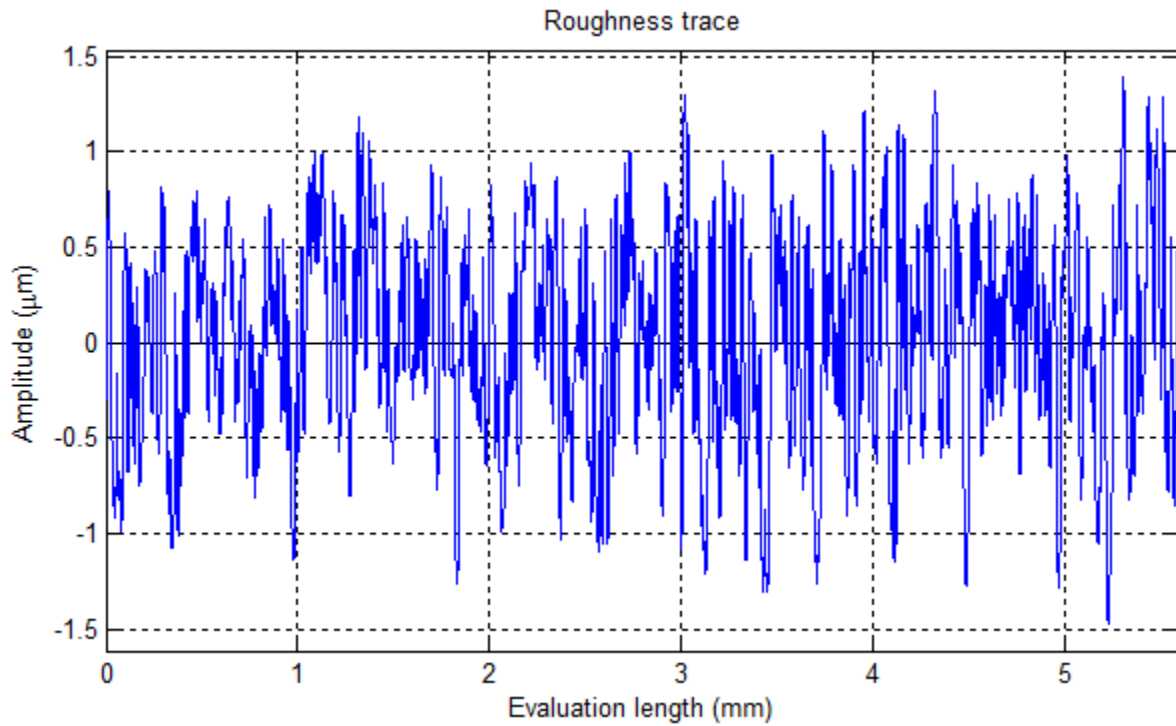


Figura 49. Representación del perfil EDM.smd en VisualSR2D

Amplitude Parameters

P_a (μm) = 0.46434 P_q (μm) = 0.55994
 P_v (μm) = 1.4677 P_t (μm) = 2.8623
 P_p (μm) = 1.3946

Spacing parameters

PSm (μm) = 92.9625 Update
 Height Discrimination % Rz
 Spacing Discrimination % sampling length

Shape parameters

P_{sk} = -0.13265 P_{ku} = 2.3646

Calculate over

☒ Evaluation length
☐ All Sampling Lengths (Lc not found)

Figura 50. Principales parámetros para EDM.smd según VisualSR2D

Legend	Total Profile	Waviness	Roughness
<u>P, W, Ra</u>	0.46434 μm		
<u>P, W, Rq</u>	0.55994 μm		
<u>P, W, Rsk</u>	-0.13265		
<u>P, W, Rku</u>	2.36461		
<u>P, W, Rz</u>	2.8623 μm		
<u>P, W, Rp</u>	1.39459 μm		
<u>P, W, Rv</u>	1.4677 μm		
<u>P, W, Rt</u>	2.8623 μm		
<u>P, W, RSm</u>	52.12991 μm		

Figura 51. Principales parámetros de EDM.smd según NIST (<http://physics.nist.gov/VSC/jsp/Filter.jsp>)

Puede observarse que hay concordancia en todos los parámetros excepto en *RSm*. Para explicar esta discrepancia, debe tener en cuenta:

- Existen discrepancias en la definición de *RSm*, como se comentó en 5.1.3 *Parámetros de Espaciado: RSm* (Leach & Harris, 2002).
- Recientemente el software de referencia del NIST corrigió un bug en el parámetro *RSm*^{xii}, luego si fiabilidad no está garantizada.
- Pese a esta corrección, su algoritmo sigue presentando problemas con este parámetro. Puede comprobarse en el algoritmo del NIST (<http://physics.NIST.gov/VSC/jsp/Filter.jsp>) que el valor de *RSm* proporcionado por el NIST es invariante ante cambios en *Spacing Discrimination*, lo que indudablemente hace que los resultados sean erróneos.
- El cálculo de *RSm* mediante el algoritmo implementado en *VisualSR2D* coincide con el propuesto por Raja (Muralikrishnan & Raja, 2009, pp. 185-186) en el caso del perfil *EDM.smd*.
- El cálculo de *RSm* mediante el algoritmo de Raja falla cuando existen ceros verdaderos en el perfil, esto es, puntos del perfil cuya ordenada es estrictamente nula, como puede pasar en el perfil *cos.smd*^{xiii} de la base de datos del NIST, lo que, aunque es extremadamente improbable que ocurra en un perfil real, presenta una limitación de cara a estudios sobre perfiles simples generados matemáticamente. *VisualSR2D* solventa este error con un algoritmo completamente diferente y más eficiente que el propuesto por Raja.

^{xii} Consúltase <http://physics.NIST.gov/VSC/jsp/News.jsp>

^{xiii}

<http://physics.NIST.gov/VSC/jsp/Database.jsp?start=0&end=20&constraint=General+Search&searchCriteria=cos&SearchAction=detail&dno=26>

Finalmente, adelantar que en el siguiente capítulo se exportará un perfil filtrado en *VisualSR2D*, y, a modo de complemento de la presente comparativa, se analizarán los parámetros tomando como referencia longitudes básicas, tanto en el *NIST* como en *VisualSR2D*.

5.2 INTRODUCCIÓN AL FILTRADO: EL FILTRADO EN LA INGENIERÍA

5.2.1 Conceptos generales sobre el filtrado

Desde un punto de vista ingenieril, las superficies son estudiadas como una fina textura llamada rugosidad. Superpuesta a esta rugosidad se encuentran una curvatura más general llamada ondulación y grandes desviaciones llamadas forma. *VisualSR2D* está enfocado a las dos primeras, cuya definición desde un punto de vista más riguroso es (Grous, 2011):

- Perfil de rugosidad: Perfil obtenido a partir del primario mediante la definición de una longitud de onda larga de rugosidad, λ_c , y de una longitud de onda corta de rugosidad, λ_s , que actúan como valores de corte. Recuérdese que es a partir de este perfil como se han calculado los parámetros de rugosidad con símbolo R en el capítulo anterior. Los estándares ISO actuales sobre este tema están recogidos en ISO 3274.

En general, el estudio de este perfil será interesante si se requiere control sobre la funcionalidad de un componente/pieza de un conjunto, por ejemplo resistencia a fallo, resistencia al desgaste, fricción, reflectividad y comportamiento a lubricación (Smith, 2002).

- Perfil de ondulación: Es obtenido a partir del primera considerando una longitud de onda larga de ondulación, λ_{cw} y una longitud de onda corta de ondulación, λ_{sw} . Tiene asociados los parámetros con símbolo W , de formulación matemática análoga a la presentada en el capítulo anterior para el caso de rugosidad, cambiando las R por W .

Proporciona información útil para el control de operación de piezas y máquinas de producción, como pueden ser las vibraciones o la generación de ruido (Smith, 2002).

Normalmente el valor elegido para λ_c es el mismo que para λ_{sw} . Existen valores estandarizados para estos parámetros tanto en las normas ASME (ASME B46.1) como en las ISO (ISO 11562), que serán tratados más adelante.

A partir de la definición anterior, en la que λ_s actúa como un filtro paso – alto y λ_c como uno paso – bajo, puede definirse el perfil de rugosidad. Consideraciones análogas con λ_{cw} y λ_{sw} conducen al perfil de ondulación.

De lo anterior parece que son necesarias dos operaciones de filtrado para la determinación de rugosidad u ondulación. En la práctica, sin embargo, a partir de una serie de simplificaciones, pueden determinarse mediante una única operación (Muralikrishnan & Raja, 2009):

1. El filtro paso – alto relacionado a λ_s es automáticamente aplicado por el instrumento de medida, y, cuando no, puede ser ignorado.
2. La longitud del perfil no es frecuente que sea lo suficientemente larga como capturar forma y, por tanto, el filtro paso – bajo con frecuencia de corte λ_{cw} no es aplicado.
3. Partiendo de que $\lambda_c = \lambda_{sw}$ y con las hipótesis anteriores rugosidad y ondulación resultan complementarias.

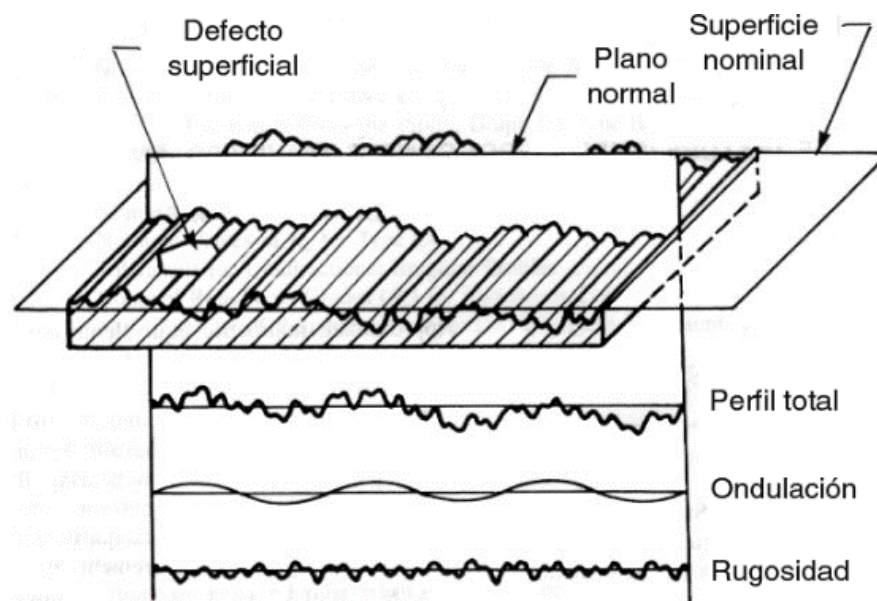


Figura 52. Perfil total arbitrario y formas típicas de los perfiles de ondulación y rugosidad

En resumen, tanto en *VisualSR2D* como en el texto subsiguiente se considera que los perfiles de rugosidad y ondulación pueden obtenerse con λ_c como única variable, dependiendo de si se utiliza como filtro paso – alto o paso – bajo.

5.2.2 Evolución Histórica

La clasificación descrita ha sido aplicada desde los inicios de los estudios de textura superficial. El motivo es que la rugosidad, ondulación y forma tienen distintos orígenes y sus implicaciones en la funcionalidad de una pieza son distintas (Whitehouse, 1994).

En los inicios del análisis de texturas superficiales los métodos de filtrado utilizados eran gráficos (Whitehouse & Reason, 1965). El perfil primitivo se dividía en segmentos de igual longitud y, en cada uno de ellos, se dibujaba la línea media, que capturaba la pendiente del perfil en dicho segmento. Considerando las

desviaciones de los puntos respecto a estas líneas medias podían filtrarse los perfiles.

El proceso anterior resultaba incómodo y consumía mucho tiempo, por lo que pronto se instauraron métodos automáticos, en concreto filtros eléctricos como el 2RC, que también presentaban desventajas, entre las que destaca el desfase de los resultados que se estudiará en profundidad en 5.5 *Filtro 2RC*.

Más adelante llegaron los filtros digitales. En un principio Whitehouse y Reason (1965) simulaban de forma digital el filtro 2RC, obteniendo resultados idénticos a aquellos a aquellos provenientes del verdadero filtro eléctrico. Si bien esto supuso un gran avance, este filtro pronto quedó obsoleto debido al principal defecto del filtro 2RC ya comentado, su desfase no lineal. Pese al desarrollo del filtro 2RC corregido en fase (Whitehouse & Reason, 1965) fue la introducción del filtro Gaussiano, con su sencilla implementación digital y ausencia de problemas de desfase, la que sentó las bases de lo que, aún a día de hoy, siguen siendo los métodos estándar de filtrado.

5.2.3 Evolución tecnológica

Con el avance en la sofisticación de los instrumentos y sensores de medida de los últimos años, existe una superposición en la información proporcionada por dichos instrumentos. Un rugosímetro estándar puede capturar rugosidad, ondulación y forma. La figura 53 muestra el actual espectro de la metrología desde el punto de vista de la toma de datos (Marlburg, 1996)

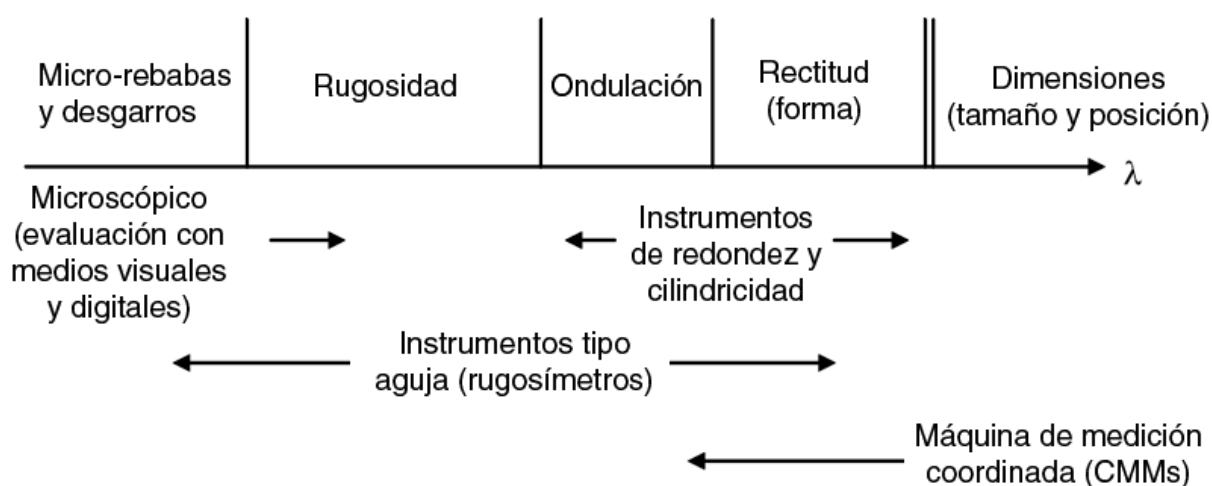


Figura 53. Superposición de los instrumentos de medida (Marlburg, 1996)

A medida que la banda de medida de los instrumentos aumenta, se hace cada vez más necesario el poder separar los datos discretos del perfil según longitudes de onda significativas antes de proceder a una caracterización numérica (Muralikrishnan & Raja, 2009). En esta línea se enmarca el módulo de filtrado de *VisualSR2D*, dentro además de las modernas técnicas de filtrado digital.

5.3 FILTRADO EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

5.3.1 Consideraciones generales acerca del filtrado en el dominio de la frecuencia

El primer módulo de filtrado que *VisualSR2D* incluye es el de Filtrado en el Dominio de la Frecuencia.

Desde un punto de vista ingenieril cualquier muestra digitalizada de una superficie puede entenderse como una señal discreta en el dominio espacial (o del tiempo), ya que dicha señal es monitorizada en función de una coordenada de posición. A partir de la teoría de Fourier, es sabido que dicha señal, ósea, dicho perfil superficial, puede ser entendido como un abanico de funciones sinusoidales con diferentes amplitudes y longitudes de onda.

De hecho, la rugosidad representa simplemente una colección de todas las componentes de alta frecuencia (o longitud de onda pequeña) de un perfil, mientras que la ondulación abarca aquellas componentes de longitud de onda media, que suponen el límite de estudio de este texto y de *VisualSR2D*. Mayores longitudes de onda quedarían englobadas en la forma, que no es objeto de estudio del presente trabajo. En definitiva, transformando al dominio de la frecuencia el perfil a estudiar pueden identificarse claramente la amplitud y la fase de las sinusoides que componen dicho perfil.

Como se explicó en 5.2.1 *Conceptos generales sobre el filtrado*, la transición entre rugosidad y ondulación es definida por el usuario a través de longitudes de ondas de corte. También se explicó el por qué solo es necesario un valor de corte para definir una banda, cuando intuitivamente podría pensarse que se requieren dos, y se definió λ_c como el parámetro principal a considerar durante el filtrado en *VisualSR2D*.

Los últimos dos párrafos definen la filosofía del módulo de Filtrado en el Dominio de la Frecuencia seguida durante el desarrollo del programa: ofrecer al usuario un análisis gráfico de qué representa el perfil a estudiar en el dominio de la frecuencia, de forma que pueda elegir en base a un criterio objetivo que longitud de onda de corte λ_c desea utilizar. A partir de dicha longitud de onda de corte λ_c , se podrán definir los filtros paso – alto y paso – bajo que determinan las longitudes de onda

a suprimir o retener en el perfil, y cuyo resultado transformado de nuevo al dominio espacial conduce a los perfiles de ondulación y rugosidad.

En resumen, los pasos a seguir son:

1. Análisis en el dominio de la frecuencia
2. Filtro de longitudes de onda
3. Filtrado del perfil

5.3.2 Análisis en el dominio de la frecuencia

El análisis del perfil en el dominio de la frecuencia exige una transformación previa a dicho dominio, que se realiza a través de la transformada de Fourier.

En el campo discreto en el que *VisualSR2D* opera, dicha transformada se define como:

$$zf(f) = \sum_{j=1}^n z(j)e^{-i2\pi f(j-1)\Delta x}$$

Donde:

- z es un vector de n elementos que contiene las ordenadas del perfil $z(i)$ el elemento i de dicho perfil.
- f es la frecuencia espacial del perfil, $f = (k - 1)/l$.
- k es un entero de 1 a $n/2 - 1$ si n , número de puntos del perfil, es par o $(n - 1)/2 + 1$ si n es impar.
- l es la longitud del perfil evaluado.
- Se cumple que $l = n\Delta x$.
- $\lambda = 1/f$ con λ longitud de onda superficial.

Con todo, la definición anterior no es utilizada por el software debido a que existe una alternativa más eficiente, la Transformada Rápida de Fourier, función embebida en MATLAB y que proporciona resultados más rápidos que la aplicación directa de la definición anterior (Press, et al., 1992).

Una vez obtenido el perfil en el dominio de la frecuencia, pueden representarse las amplitudes de las componentes sinusoidales en función de su longitud de onda. La siguiente figura muestra el perfil *EDM.smd* presentado en el capítulo anterior en el dominio espacial y en el dominio de la frecuencia.

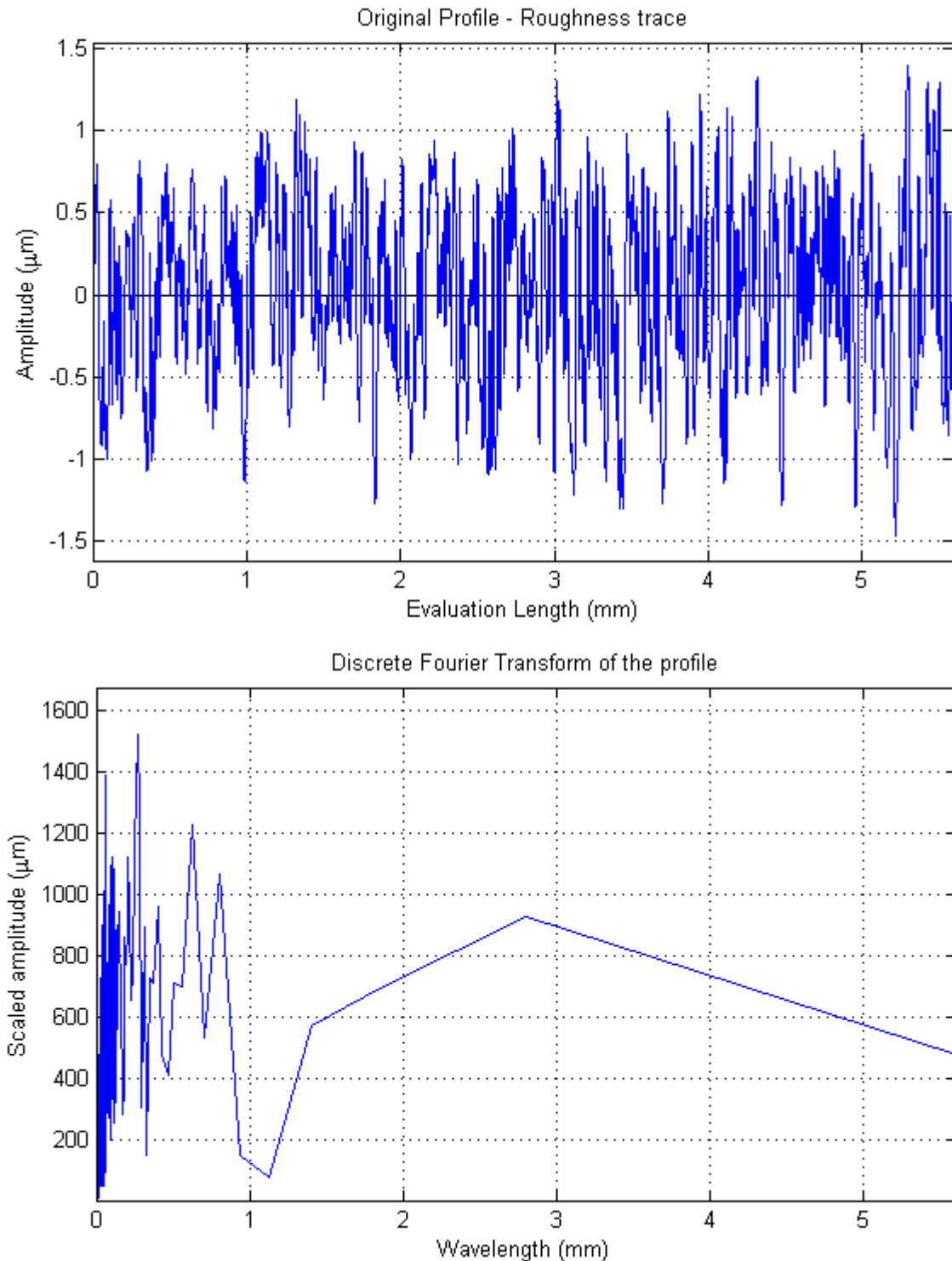


Figura 54. Representación del perfil *EDM.smd* (obtenido de *NIST.gov*) en el dominio espacial (arriba) y en el dominio de la frecuencia (abajo) tras aplicar la Transformada Rápida de Fourier.

5.3.3 Filtro de longitudes de onda

Definido un corte en las longitudes de onda y el tipo de filtro a utilizar, paso-alto o paso-bajo, se define un filtro cuya función será suprimir todas las longitudes de onda mayores (paso – bajo) o menores (paso – alto) a dicho valor de corte.

El filtro aquí utilizado es un filtro pasa – no pasa, lo que implica que asignará únicamente los pesos 0 y 1, con la transición entre ambos a la longitud de onda de corte.

Matemáticamente la función de este filtro es pues atenuar la amplitud de las sinusoides asociadas a las longitudes de onda deseadas.

Nótese que si decide utilizarse un filtro paso – bajo estará dejándose pasar las menores longitudes de onda, esto es, las frecuencias mayores, y por tanto se obtendrá un perfil de rugosidad, mientras que si se utiliza un filtro paso – alto dichas longitudes de onda pequeñas serán eliminados, quedando únicamente las componentes de alta longitud de onda y baja frecuencia, esto es, las componentes de un perfil de ondulación.

En la siguientes figuras se muestran ejemplos de definición de filtros sobre el perfil *EDM.smd* en el dominio de la frecuencia, lo que representa el núcleo de este módulo en *VisualSR2D*: poder determinar de forma visual, rápida y objetiva que componentes del perfil original desean conservarse y cuáles no.

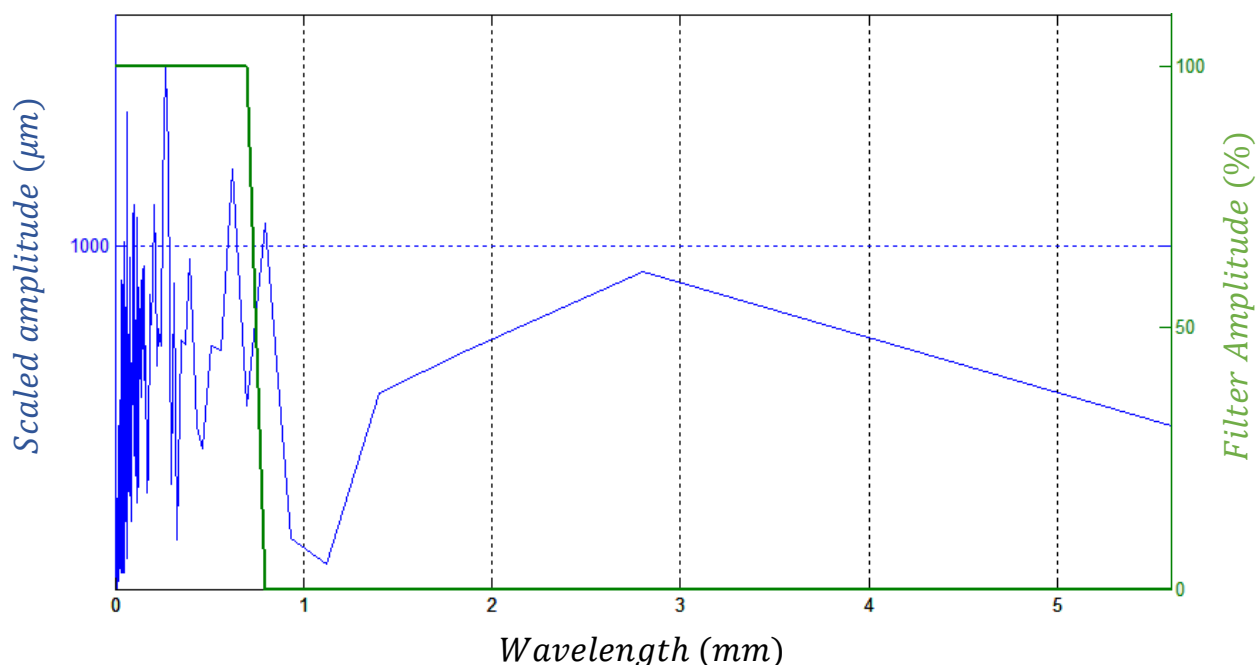


Figura 55. Representación de *EDM.smd* en el dominio de la frecuencia (en azul, eje de la izquierda) y de un filtro paso – bajo con longitud de onda de corte $\lambda_c = 0.25$ mm. Aquellas longitudes de onda por debajo del corte quedarían filtradas, de forma que las frecuencias altas del perfil se suprimirían y resultaría un perfil de ondulación.

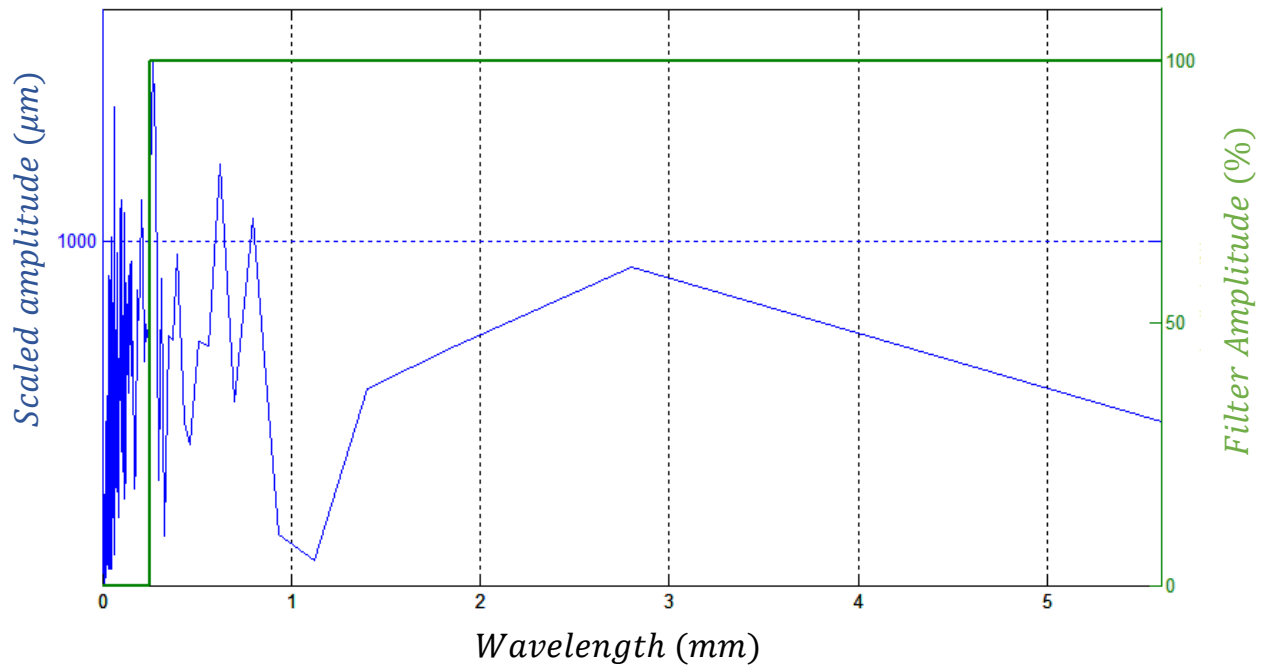


Figura 42. Representación de EDM.smd en el dominio de la frecuencia (en azul, eje de la izquierda) y de un filtro paso – alto con longitud de onda de corte $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$. Aquellas longitudes de onda por encima del corte quedarían filtradas, de forma que las frecuencias bajas del perfil se suprimirían y resultaría un perfil de rugosidad.

Es preciso resaltar que, por consideraciones matemáticas en el desarrollo del filtro en MATLAB, cuando mayor es la longitud de onda de corte λ_c menos puntos posee el vector que contiene al filtro, denominado Sf en el código interno del programa.

Esto hace que a medida que se utilizan λ_c mayores, como es el caso de la figura 56, la representación que MATLAB hace parezca que exista una zona de transición en la que la transmitancia del filtro no es ni 0 ni 100%, cuando, en realidad estos son los únicos valores utilizados.

5.3.4 Filtrado del perfil

Definido el filtro a utilizar, Sf , y la transformada del perfil al dominio de la frecuencia zf , la forma de aplicar el filtro es una multiplicación término a término de los vectores Sf y zf . La transformada inversa de Fourier proporciona el perfil filtrado.

También en el caso de la transformada inversa de Fourier se ha utilizado la función intrínseca de MATLAB *ifft*, que sería la contrapartida de la Transformada Rápida de Fourier.

La siguiente figura es el resultado de la aplicación de los filtros descritos en el punto anterior sobre el perfil *EDM.smd*, una vez aplicada la Transformada Inversa de Fourier para devolverlo al dominio espacial.

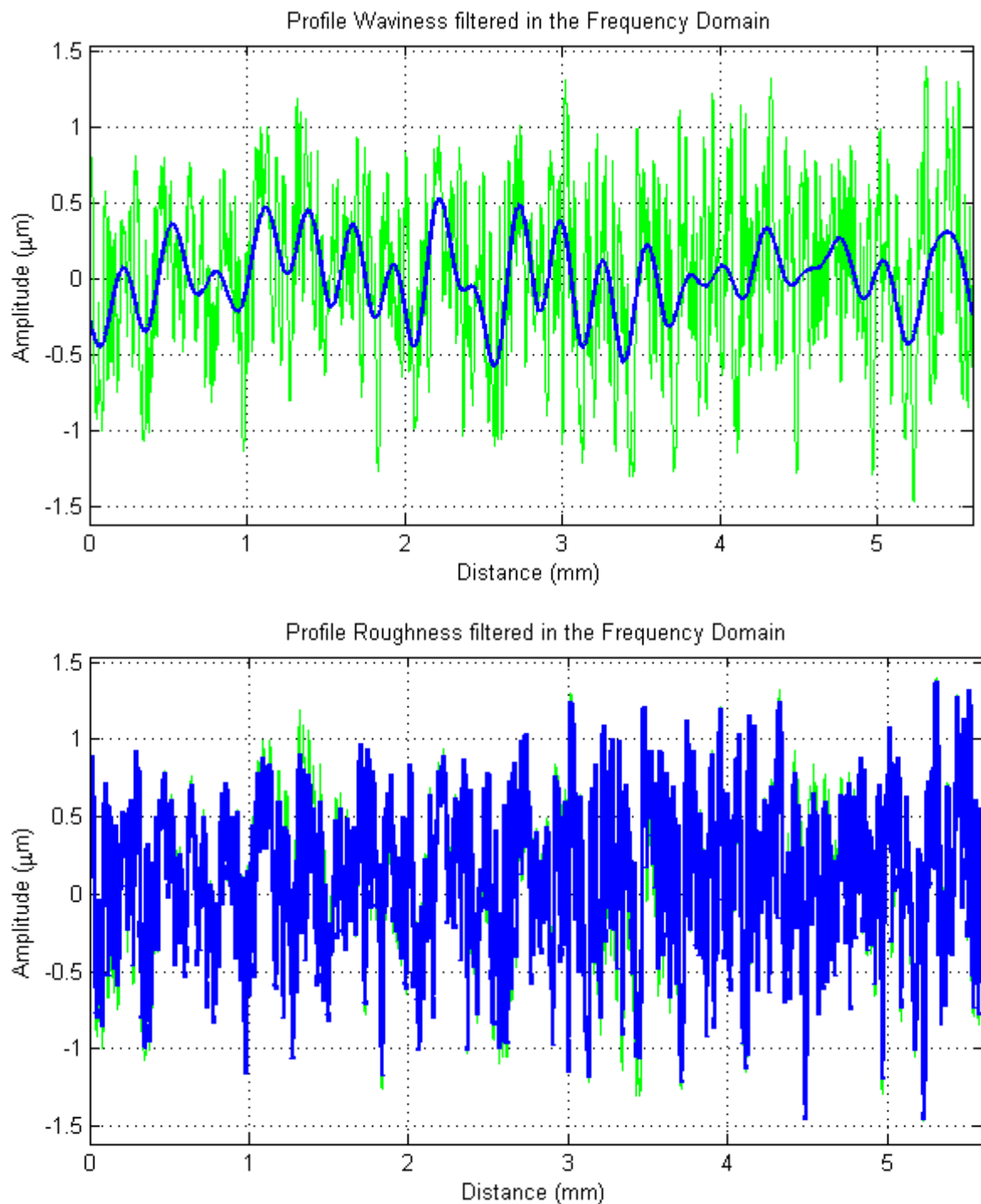


Figura 57. Resultado de aplicar sobre el perfil *EDM.smd* los filtros paso – alto (arriba) y paso – bajo (abajo) descritos en 5.3.3 Filtro de longitudes de onda. En el fondo, en color verde, se muestra el perfil original.

5.3.5 Implementación del módulo Filtrado en el Dominio de la Frecuencia y el módulo de exportación de perfiles filtrados en VisualSR2D

A lo largo de los puntos anteriores se han explicado los pasos típicos de operación en el módulo de Filtrado en el Dominio de la Frecuencia de *VisualSR2D*, y se han representado los resultados que ofrece el programa a lo largo de dicho proceso.

Para poder seguir estos pasos, *VisualSR2D* ofrece una interfaz gráfica en la que pueden modificarse los siguientes parámetros:

- Longitud de onda de corte
- Tipo de filtro a utilizar / perfil que se desea obtener

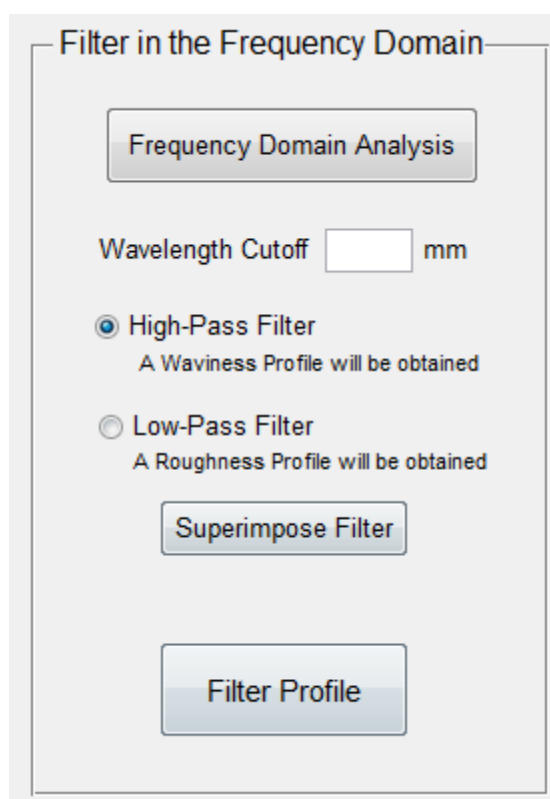


Figura 58. Vista general de la interfaz gráfica del módulo Filtrado en el Dominio de la Frecuencia de *VisualSR2D*

Filtrar un perfil en *VisualSR2D*, bien sea a través del método del dominio de la frecuencia aquí expuesto (llamado filtro FTT en *VisualSR2D*), un filtro Gaussiano (ver 5.4 *Filtro Gaussiano*) o un filtro 2RC (ver 5.5 *Filtro 2RC*), da acceso al submódulo de exportación de perfiles filtrados del programa.

Visualmente, una vez aplicado un filtro, aparece el botón *Export filtered profile*, exportar perfil filtrado, ver figura 59.

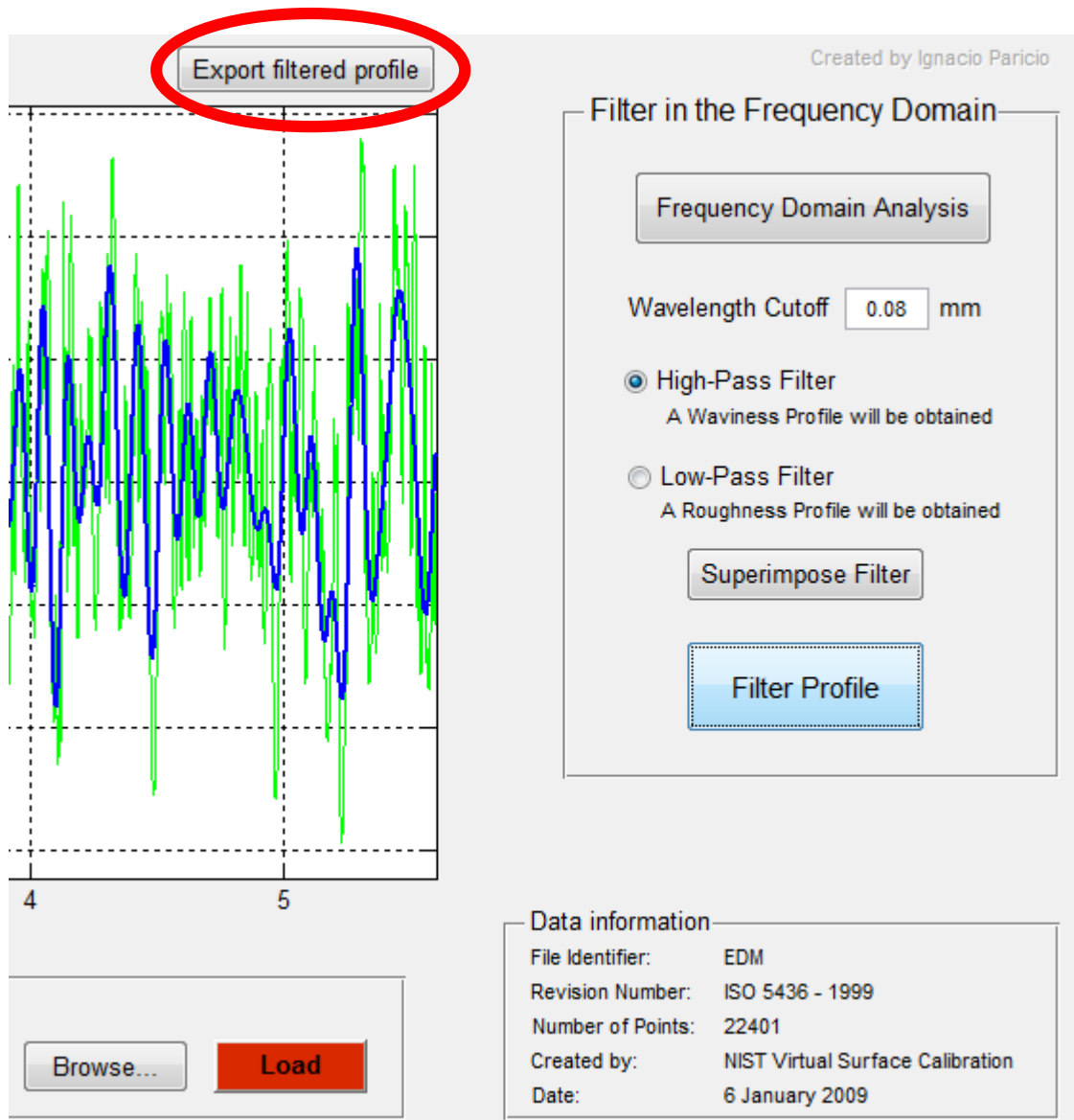


Figura 59. Botón Export filtered profile tras filtrar un perfil en VisualSR2D

Esta sub-función genera un nuevo fichero *.smd*, en el que:

- Los datos del perfil filtrado son incluidos. Si el perfil filtrado tiene menos puntos que el perfil original, caso de los filtros Gaussiano y 2RC, solo los puntos en los que es filtro es válido son exportados.
- El identificador del fichero es modificado indicando el tipo de filtro utilizado y el tipo de perfil obtenido. Así por ejemplo, tras filtrar el fichero *EDM.smd* con identificador *EDM* en el dominio de la frecuencia para obtener un perfil de ondulación como se muestra en la figura 57, el identificador del fichero exportado será *EDM_FFT_Waviness*.

- El nombre del fichero es modificado de forma similar. Siguiendo con el ejemplo anterior, el fichero resultante se llamará *EDM_FTT_Waviness.smd*.
- Los campos obligatorios del fichero *.smd*, descritos en la Norma ISO 5436, son automáticamente rellenados, cumpliéndose que:
 - El número de revisión (The_Revision_Number) será siempre ISO 543336-2:2001, norma en la que *VisualSR2D* está basado.
 - El identificador del fichero (File_Identifier) será el ya comentado.
 - El perfil resultante (Feature_Type) siempre será bidimensional, tipo PRF.
 - El eje x será tipo (Axis_type) incremental.
 - El eje z será tipo (Axis_type) absoluto.
 - Las unidades (Units) de ambos ejes serán μm .
 - El factor de escala (Scale_factor) será 1 para ambos ejes.
 - Ambos tipos de datos serán numéricos en precisión doble, tipo D (Axis_data_type).
 - El valor incremental del eje x coincidirá con el del perfil original.
- Se rellenarán los campos opcionales fecha (Date), hora (Time) y creador (Created_by) con la fecha y hora actuales y el nombre del programa respectivamente.
- Se cumplimentará también el campo opcional PROFILE_FILTER. Este campo fue descrito en *5.1.5 Implementación del Módulo Parámetros en VisualSR2D*. Es el campo normalizado de acuerdo a los estándares ISO 5436-2 que permite introducir información sobre el tipo de filtrado al que ha sido sometido el perfil. *VisualSR2D* lo cumplimentará del siguiente modo:

PROFILE_FILTER <nombre del filtro> Lc <valor de Lc>

Siendo los valores posibles para <nombre del filtro> FFT, Gaussian y 2RC, y <valor de Lc> el introducido por el usuario.

La inclusión de este campo junto a la inclusión de información sobre el del tipo de perfil filtrado tanto en el identificador como en el nombre del archivo hace que la salida de la sub-función de exportación de perfiles filtrados de *VisualSR2D* por un lado esté completamente estandarizada y en línea con otros grandes algoritmos de referencia como el del *NIST*, y por otro que esté complementemente alineada con el módulo de parámetros.

Terminada la exportación el programa ofrece al usuario la posibilidad de cargar directamente el perfil filtrado para el análisis de sus parámetros. De esta forma, para un perfil medio, el tiempo desde que decide aplicarse un filtro hasta que se tienen en pantalla los parámetros del perfil ya filtrado es de segundos.

Cuando *VisualSR2D* carga un perfil proveniente de su propio módulo de exportación, o cualquier otro que incluye los campos tipo de filtro, valor de L_c , y tipo de perfil generado, se mostrará información adicional en la interfaz que permita identificar de forma rápida el proceso de filtrado seguido por dicho perfil (figura 60) y será posible evaluar los parámetros de dicho perfil tomando como referencia tanto la longitud de evaluación como las diferentes longitudes básicas, iguales a dicho valor de L_c (ver figura 61).

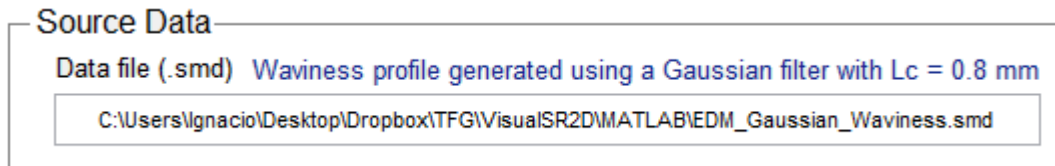


Figura 60. Carga de un perfil con toda la información referente al filtrado cumplimentada y distinción que *VisualSR2D* hace del mismo tras su análisis.

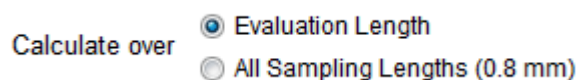


Figura 61. Identificación del valor de L_c como longitud básica de un perfil exportado previo proceso de filtrado en *VisualSR2D*

5.4 FILTRO GAUSSIANO

5.4.1 Consideraciones generales acerca del filtro Gaussiano

De acuerdo a la Norma ISO 11562 -1996, el filtro Gaussiano es el único filtro aplicable al estudio de acabados superficiales de forma estandarizada, y es recomendado tanto en dicha norma como en la americana ASME B46-1995 para determinar la línea media en estudios metrológicos (Yuan & Vorburger, 2000).

Su función de peso viene dada por:

$$S(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_c} e^{-\pi \left(\frac{x}{\alpha \lambda_c} \right)^2}$$

Con $\alpha = \sqrt{\ln 2 / \pi}$, x la variable independiente en el dominio del tiempo y λ_c la longitud de onda de la frecuencia de corte superior.

La Norma ISO 3274 – 1996 estandariza los valores nominales de las frecuencias de corte anteriores, que son obtenidos de la serie:

$$\dots mm; 0.08 mm; 0.25 mm; 0.8 mm; 2.5 mm; 8mm; \dots mm$$

Si bien *VisualSR2D* no restringe el valor de λ_c a utilizar, se recomienda utilizar para un gran rango de perfiles únicamente los valores 0.25mm, 0.8mm y 2.5mm, pues esto son los más usados en la práctica (NPL, 2014).

Puede demostrarse que el filtro Gaussiano atenúa la entrada en un 50% a dicha frecuencia de corte (Muralikrishnan & Raja, 2009). Esto implica que, a diferencia del filtrado en el dominio de la frecuencia descrito en el apartado anterior, el filtro Gaussiano no suprime de forma abrupta aquellas longitudes de onda menores a la de corte, sino que las atenúa de forma gradual.

Es también interesante el hecho de que el filtro Gaussiano no simula ningún filtro electrónico (como se verá que sí hace el filtro 2RC), sino que es una función puramente matemática aplicada a una serie de datos. Una de las ventajas que esto implica es que los resultados obtenidos al aplicar este filtro no presentan desfase, y por tanto resultan ser más realistas que los obtenidos mediante otros tipos de filtrado (Smith, 2002).

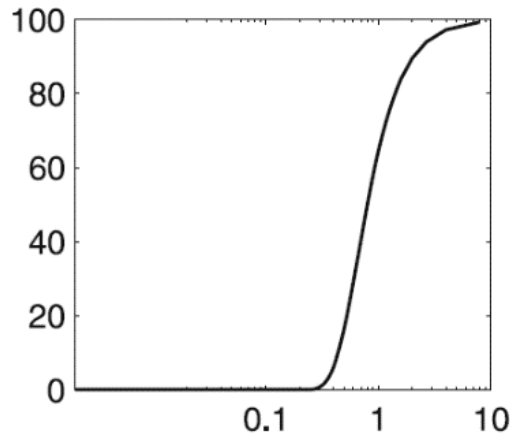


Figura 62. Transmisión característica de un filtro Gaussiano con $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$

Debe tenerse en cuenta que el filtro Gaussiano que *VisualSR2D* incorpora internamente es un filtro paso – alto, puesto que únicamente transmite longitudes de onda mayores que la de corte, componentes de baja frecuencia. Un filtro paso-bajo, por tanto, producirá un perfil de ondulación, más suave que el original.

Un filtro Gaussiano puede, de igual forma, diseñarse para transmitir únicamente las frecuencias altas, teniendo así un filtro paso – alto. Un filtro paso – alto también transmite un 50% de la entrada a la frecuencia de corte, esto es, se cumple que, para un λ_c , si $Sf(\lambda)_b$ es la transmisión del filtro paso-bajo asociado y $Sf(\lambda)_a$ es la del paso-alto, entonces:

$$Sf(\lambda)_b = 1 - Sf(\lambda)_a$$

O lo que es lo mismo, la componente de alta frecuencia del perfil puede obtenerse sustrayendo la componente de baja frecuencia al perfil primitivo y viceversa. La consecuencia directa es que no es necesaria la aplicación de dos filtros (paso – bajo y paso – alto) para extraer información de las componentes de baja y alta frecuencia del perfil. Este es el motivo por el que internamente *VisualSR2D* solo incorpora un tipo de filtro pero, tras el filtrado, permite mostrar tanto la rugosidad como la ondulación que resultaría de aplicar uno u otro filtro al perfil.

Existen dos aproximaciones distintas pero igualmente válidas para la implementación de un filtro Gaussiano en un perfil discreto:

1. Convolución discreta en el dominio del tiempo.
2. Transformada de Fourier al dominio de la frecuencia, aplicación de funciones de peso a las longitudes de onda individuales y transformar de nuevo al dominio del tiempo.

La única diferencia entre los resultados obtenidos mediante estos métodos en *VisualSR2D* se produce en los extremos, dado que la operación en el dominio de la frecuencia utiliza una hipótesis errónea: que el perfil es periódico.

Como consideración final, es importante resaltar que el filtro Gaussiano no introduce cambios de fase relativos entre las distintas componentes sinusoidales del perfil. En otras palabras, cada senoide de salida del filtro estará en fase con su respectiva componente de entrada. Esta ausencia de desfase es una de las mayores ventajas del filtro Gaussiano.

5.4.2 Filtrado mediante Convolución

Sea $S(x)$ el filtro Gaussiano descrito en el apartado anterior y $z(x)$ el vector de ordenadas de un cierto perfil. El perfil de ondulación (o línea media del perfil) $m(x)$ será:

$$m(x) = z(x) * S(x)$$

Adicionalmente, y de acuerdo con lo explicado previamente acerca como filtros paso-alto y paso-bajo se complementan, si $r(x)$ es el perfil de rugosidad, entonces:

$$r(x) = z(x) - m(x)$$

5.4.3 Filtrado mediante transformada de Fourier, FFT

En el caso de filtrado en el dominio de la frecuencia, tanto el perfil original $z(x)$ como el filtro Gaussiano $S(x)$ son transformados haciendo uso de la Transformada Rápida de Fourier, FTT, obteniéndose así los respectivos vectores en el dominio de la frecuencia $zf(f)$ y $Sf(f)$.

En el dominio de la frecuencia basta con multiplicar componente a componente los vectores $zf(f)$ y $Sf(f)$ para obtener $mf(f)$, perfil de ondulación en el dominio de la frecuencia:

$$mf(f) = zf(f) \cdot Sf(f)$$

Solo resta aplicar la transformada inversa de Fourier a $mf(f)$ para obtener $m(x)$. Nótese que para obtener $r(x)$ debería procederse de forma análoga a como se indicó en el apartado anterior, no siendo válido obtener $rf(f)$ como la sustracción de $mf(f)$ a $zf(f)$ y posteriormente aplicar transformada inversa de Fourier.

5.4.4 Implementación del filtro Gaussiano en *VisualSR2D*

Como se ha comentado anteriormente, el valor de entrada λ_c no está restringido en *VisualSR2D*, si bien se recomienda utilizar los valores especificados en el punto 5.4.1 *Consideraciones generales acerca del filtro Gaussiano*.

La interfaz, desarrollada tomando como referencia la del *NIST*, permite:

- Elegir método de cálculo entre los especificados en 5.4.2 *Filtrado mediante Convolución* y 5.4.3 *Filtrado mediante transformada de Fourier, FFT*.
- Seleccionar la forma en la que está definiéndose el filtro a partir de la entrada λ_c (ver figura 63).
- Introducir dicho valor λ_c .
- Seleccionar el tipo de perfil a obtener: rugosidad u ondulación, para lo que el programa realiza las operaciones descritas en 5.4.1 *Consideraciones generales acerca del filtro Gaussiano*.

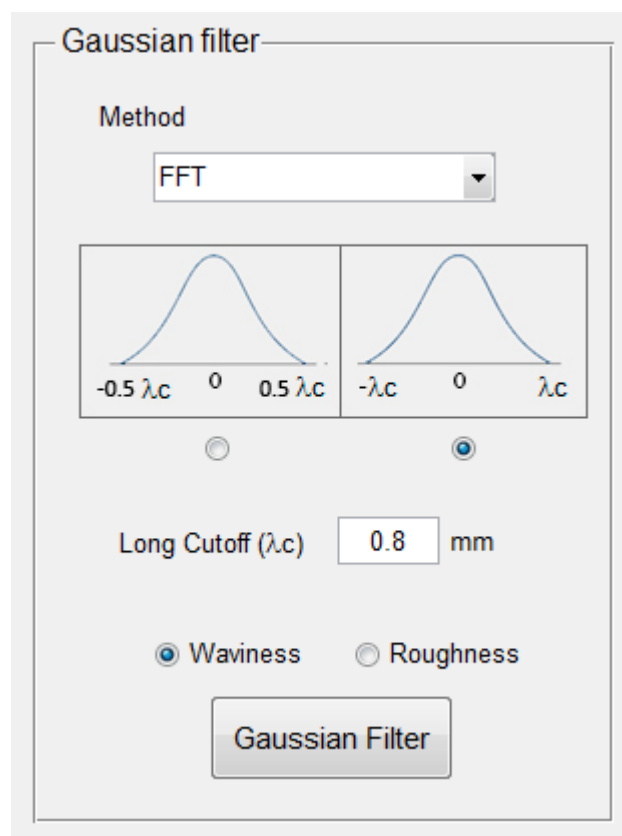


Figura 63. Vista general de la interfaz gráfica del módulo Filtro Gaussiano de *VisualSR2D*

Debe tenerse en cuenta que una vez definido un valor de λ_c quedan definidas las longitudes básicas del perfil, y el perfil filtrado no mostrará ni la primera ni la última.

La razón es que el filtro Gaussiano usa, en cada punto, datos de los puntos vecinos para determinar el valor del punto original tras el filtrado. En concreto, dicha vecindad de puntos viene definida por el valor de λ_c . Por tanto, entre el comienzo del perfil y λ_c el filtro Gaussiano no dispone de datos suficientes como para proporcionar resultados. El mismo razonamiento puede aplicarse al tramo entre el final del perfil y el final del perfil menos la longitud λ_c .

Existen sin embargo alternativas que permiten paliar este problema, como puede ser completar con ceros los puntos no existentes y necesarios para el filtro en dichos tramos (Muralikrishnan & Raja, 2009), si bien las soluciones obtenidas a partir de esta técnica no son válidas desde un punto de vista formal debido a su arbitrariedad.

Por último, tras aplicar un filtro Gaussiano, se activa la sub-función de exportación de perfiles filtrados de *VisualSR2D* ya descrita en 5.3.5 *Implementación del módulo Filtrado en el Dominio de la Frecuencia y el módulo de exportación de perfiles filtrados en VisualSR2D*.

5.4.5 Comparativa de resultados del módulo Filtro Gaussiano con el algoritmo de referencia del NIST

A continuación se muestra una comparativa gráfica entre los resultados obtenidos al aplicar un filtro Gaussiano al perfil *EDM.smd* mediante *VisualSR2D* y mediante el algoritmo de referencia del NIST.

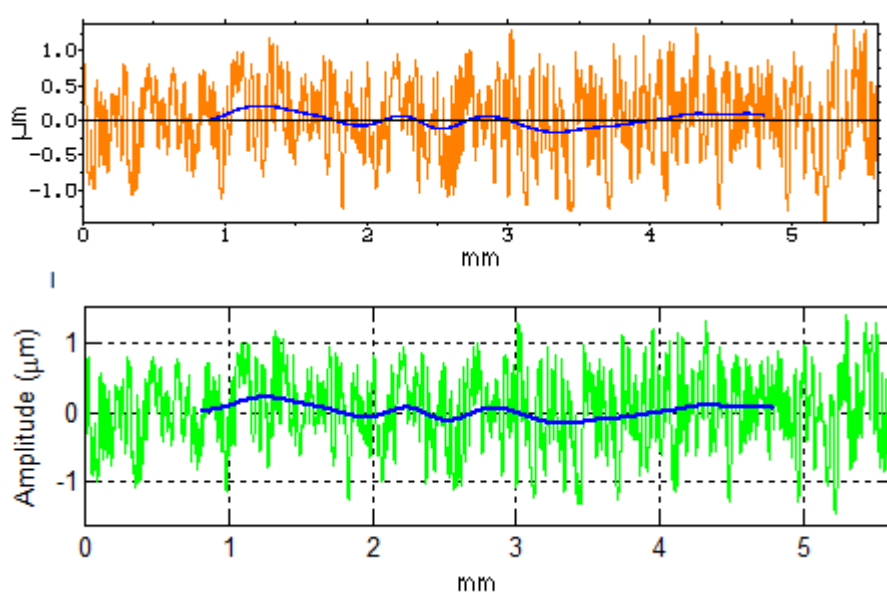


Figura 64. Comparación entre Filtros Gaussianos con $\lambda_c = 0.8mm$ entre el NIST (arriba) y *VisualSR2D* (abajo).

Se ha utilizado un $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$ como filtro paso – alto, esto es, se ha filtrado de forma que el perfil resultante es de ondulación.

Una comparación más rigurosa puede llevarse a cabo utilizando los módulos de exportación de ambos *NIST* y *VisualSR2D*. En el *NIST*, puede aplicarse el filtro y descargarse el perfil resultante en formato *.smd*. De igual forma *VisualSR2D* permite exportar perfiles filtrados como ya se ha comentado.

Obtenidos ambos ficheros *.smd*, pueden bien compararse directamente o bien utilizando alguna herramienta matemática para representarlos de forma simultánea.

5.5 FILTRO 2RC

5.5.1 Consideraciones generales acerca del filtro 2RC

El filtro 2RC (*two resistors and two capacitors*) fue el primero en utilizarse en el estudio metrológico de superficies. En sus inicios, su implementación se realizaba mediante componentes físicos, resistencias y condensadores, si bien hoy en día puede ser introducido de forma digital, lo que obviamente supone la forma en la que *VisualSR2D* trata este filtro.

El filtro 2RC no tiene linealidad en fase, y por tanto plantea dificultades adicionales al filtro Gaussiano, entre las que destacan:

- Rugosidad y ondulación deben ser separados.
- La salida del filtro debe ser corregida.

Aunque este filtro fue ampliamente utilizado en sus inicios, ya que supuso el primer paso en la automatización del filtrado superficial, hoy en día está por detrás del filtro Gaussiano en cuanto a nivel de implementación debido a éstas dificultades.

Consecuencia directa es que, a diferencia del filtro Gaussiano, el filtro 2RC no es considerado en las normas ISO, si bien sí que existe un estándar americano al respecto, ASME B46.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2002).

La siguiente función de peso es utilizada para obtener perfiles de ondulación mediante el filtro 2RC:

$$S(x) = \frac{A}{\lambda_c} \left(2 - \frac{A|x|}{\lambda_c} \right) \exp \left(-\frac{A|x|}{\lambda_c} \right)$$

Donde $A = 3.64$, x es la posición desde el origen de la función de peso y λ_c es la ya conocida longitud de onda de corte.

La transformada de Fourier de la función continua $S(x)$ es:

$$Sf(\lambda) = \left(1 - jk \frac{\lambda}{\lambda_c} \right)^{-2}$$

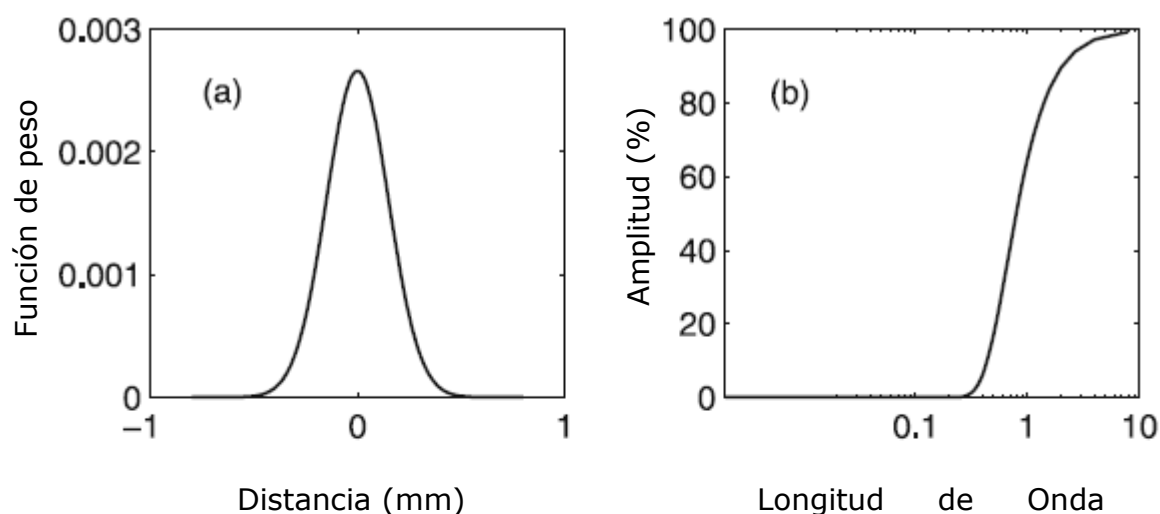
Con $k = 1/\sqrt{3}$ y $j = \sqrt{-1}$.

Es importante destacar que la aplicación del filtro en el dominio espacial mediante métodos convolutivos proporcionará una "línea media" del perfil. La diferencia entre esta línea media y el perfil primario proporcionará el perfil de rugosidad.

Nótese no obstante que ya está presente la primera de las dificultades comentadas acerca de este filtro, pues hablar de línea media no es lo mismo que hablar de ondulación. En otras palabras, la aplicación que se hace de este filtro en *VisualSR2D* está enfocada a obtener el perfil de rugosidad, para lo cual deberá calcularse previamente dicha línea media, pero en ningún momento se obtiene el perfil de ondulación del perfil^{xiv}.

A partir de lo anterior podría deducirse que, a diferencia del filtro Gaussiano, en el que existía complementariedad entre rugosidad y ondulación, la atenuación de amplitud del filtro 2RC a la longitud de onda de corte será distinta al 50%.

Filtro Gaussiano



Filtro 2RC

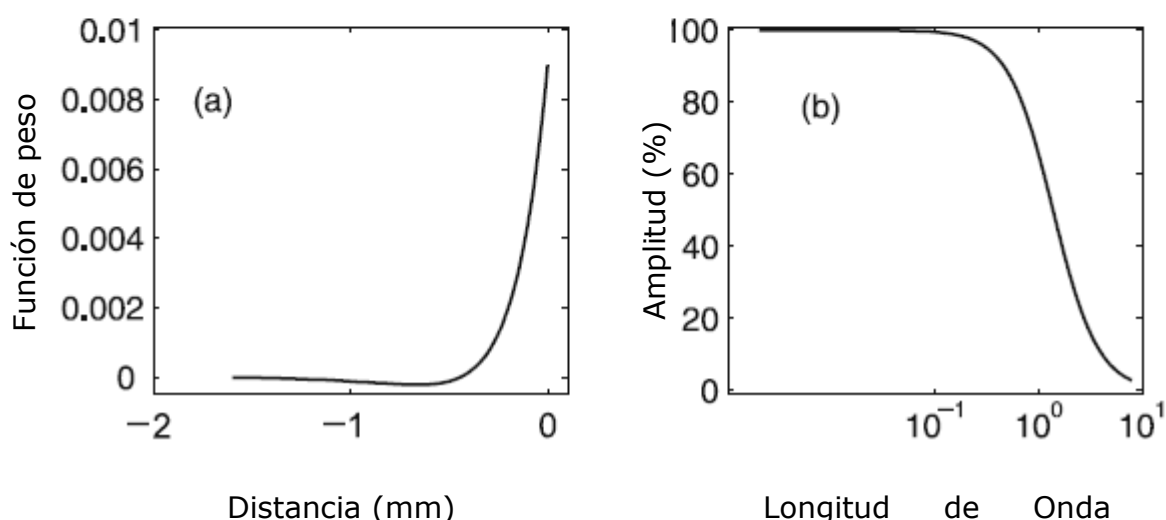


Figura 65. Comparativa entre las funciones de peso y las transmisiones características de los filtros Gaussiano (arriba) y 2RC (abajo). En ambos casos $\lambda_c = 0.8\text{mm}$.

^{xiv} Si bien la utilización de λ_c como filtro paso – alto en un filtro 2RC no produce un perfil de ondulación sino una línea media, si ésta es exportada *VisualSR2D* asignará al fichero resultante la etiqueta de *Waviness* por cuestiones de nomenclatura estandarizada.

En efecto, para este filtro, dicho valor resulta ser del 75%, que puede demostrarse particularizando $\lambda = \lambda_c$ en la ecuación del filtro en el dominio de la frecuencia. Este valor de atenuación conduce a la segunda dificultad del filtro 2RC, dado que las sinusoides de distintas longitudes de onda serán desplazadas en fase en cantidades no iguales, lo que introducirá distorsión en el perfil.

5.5.2 Implementación del filtro 2RC en *VisualSR2D*

El filtro 2RC no es simétrico respecto al origen, a diferencia del Gaussiano, ver figura 65. Por tanto, el filtro debe reflejarse respecto al origen antes de realizar una convolución con el perfil original, que en *VisualSR2D* realiza la propia función *conv* de MATLAB.

El resultado de dicha convolución es un perfil de longitud $n+m-1$, donde n es la longitud del perfil primitivo y m es la longitud del filtro. En el caso de filtros simétricos, los n elementos centrales de la convolución representaban el perfil de ondulación, mientras que en el caso del filtro 2RC los n primeros representan la línea media.

Recuérdese que en el punto 5.4.4 *Implementación del filtro Gaussiano en VisualSR2D* se explicó la razón por la cual el filtro no estaba definido ni en la primera ni en la última longitud básica del perfil. Consideraciones similares conducen a que en el filtro 2RC son las dos primeras longitudes básicas las que no pueden calcularse. Para entender este efecto basta con observar cómo están distribuidas las funciones de peso en la figura 65. Mientras que el filtro Gaussiano necesitaba datos en un entorno de radio λ_c respecto al punto en consideración, el filtro 2RC hace uso de todos los puntos situados una distancia $2\lambda_c$ por detrás del perfil, y, por tanto, en las dos primeras longitudes básicas no es calculado en *VisualSR2D* debido a que no existen puntos suficientes.

De nuevo aquí puede considerarse como alternativa rellenar con ceros los puntos restantes, tal y como se planteó como posible alternativa para el filtro Gaussiano (Muralikrishnan & Raja, 2009), pero tampoco en este caso dicha solución ha sido implementada en *VisualSR2D* debido a que la referencia seguida, algoritmo del *NIST*, no opta por esta alternativa.

En cuanto a las opciones que el programa ofrece, son similares a aquellas del filtro Gaussiano, y permite:

- Elegir método de cálculo convolución y recursivo.
- Introducir dicho valor λ_c .
- Seleccionar el tipo de perfil a obtener: rugosidad o línea media, para lo que se tienen en cuenta las consideraciones descritas en 5.5.1 *Consideraciones generales acerca del filtro 2RC*.

En este caso no se hace una diferenciación explícita entre los dos métodos de cálculo que ofrece el programa, convolución y recursivo, dado que son muy similares. La diferencia es que mientras que el método de convolución utiliza el comando *conv* de MATLAB para realizar la convolución propiamente dicha, el método recursivo aplica punto a punto el filtrado, siendo considerablemente más lento que el primer método, si bien conduce a resultados idénticos.

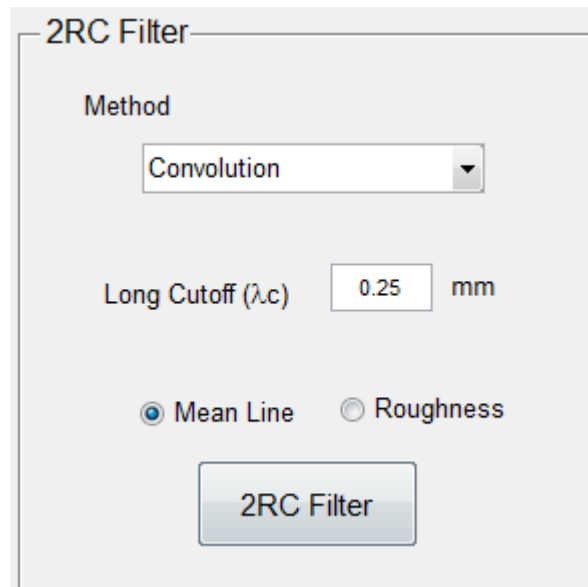


Figura 66. Interfaz gráfica del módulo 2RC filter de VisualSR2D

Finalmente, el desfase en la salida propio de este filtro también se hace patente en su implementación en el programa. Dicho desfase aumenta a medida que aumenta la longitud de onda de corte λ_c como se muestra en la figura 67.

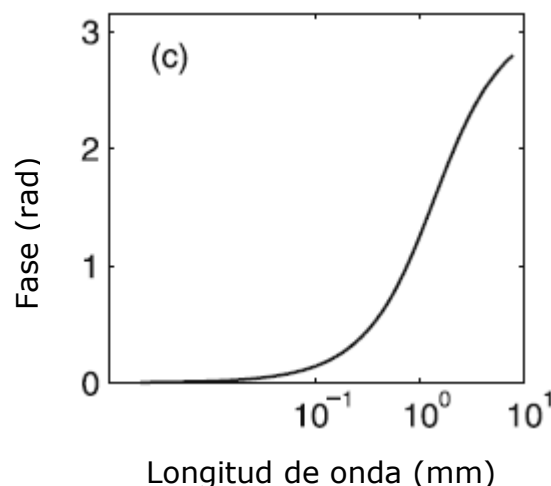


Figura 67. Fase característica a la salida del filtro 2RC en función de la longitud de onda

Como ejemplo, van a obtenerse las líneas medias del perfil *EDM.smd* a partir del filtro 2RC con dos λ_c diferentes, *0.025* y *0.25 mm*:

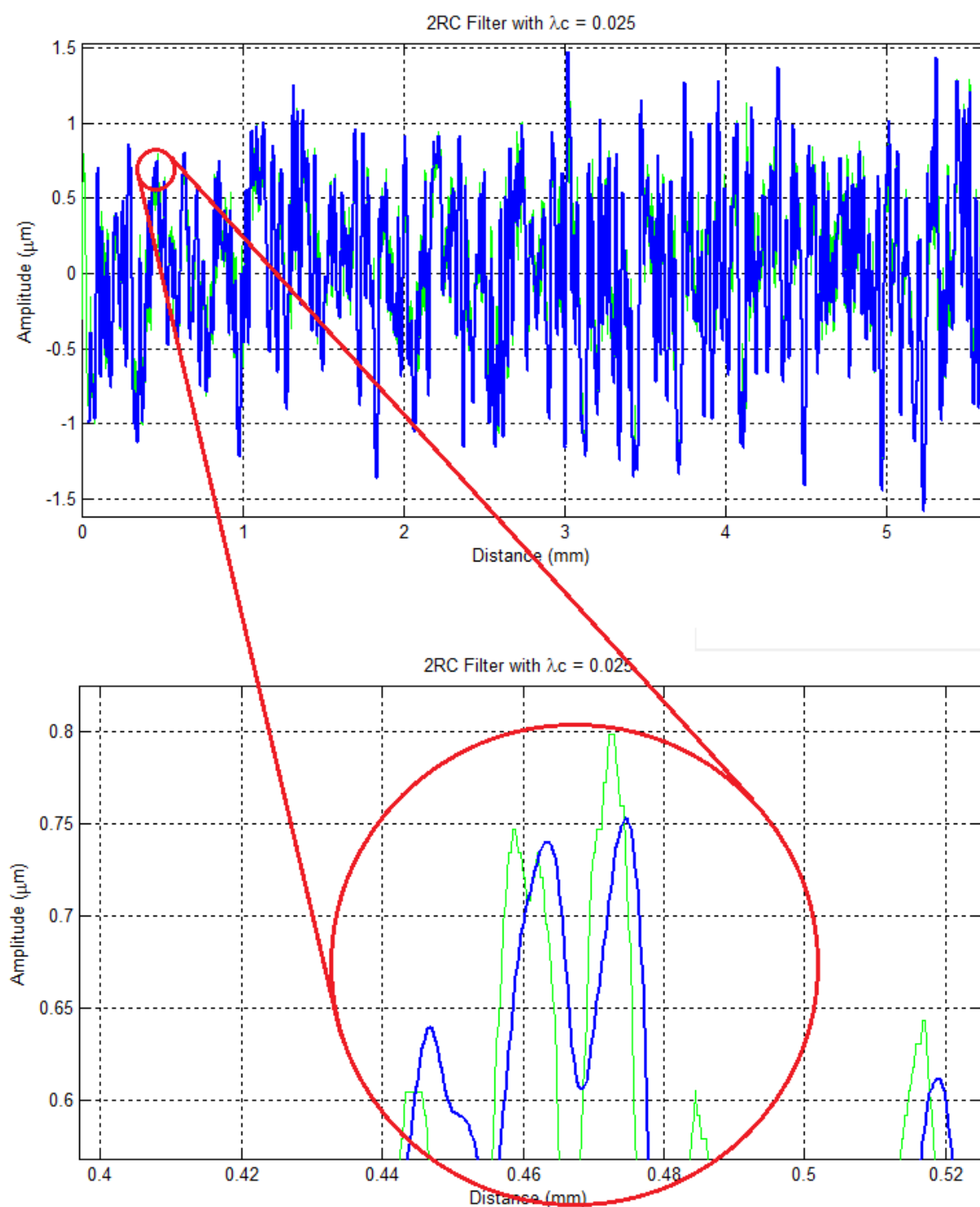


Figura 68. Línea media del perfil EDM.smd utilizando un filtro 2RC con $\lambda_c = 0.025\text{mm}$ y zoom para observar el desfase entre el perfil original (verde) y el perfil filtrado (azul).

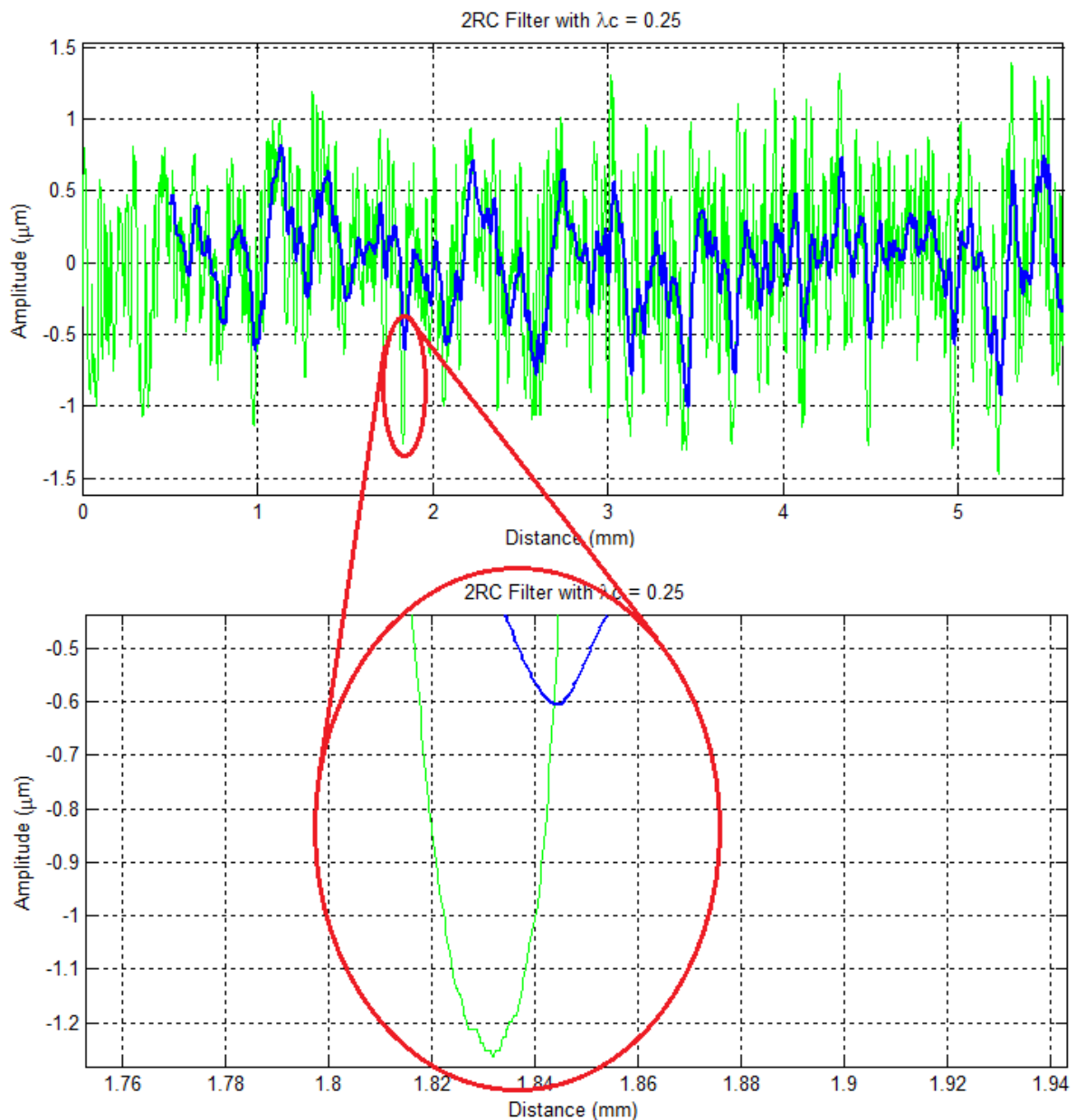


Figura 69. Línea media del perfil EDM.smd utilizando un filtro 2RC con $\lambda_c = 0.25\text{mm}$ y zoom para observar el desfase entre el perfil original (verde) y el perfil filtrado (azul).

A simple vista puede comprobarse que el desfase (en mm) en el primer caso es de aproximadamente 0.002mm mientras que en el segundo es de 0.01mm . El aumento del desfase con la longitud de onda de corte queda por tanto patente en este ejemplo.

5.5.3 Comparativa entre el filtro 2RC y el filtro Gaussiano

A lo largo del presente capítulo ya se han destacado las diferencias más notables entre los filtros 2RC y Gaussiano. El objetivo de este apartado es presentar media

un ejemplo cómo dichas diferencias afectan a los resultados finales del proceso de filtrado.

Para ello se considera de nuevo el perfil *EDM.smd* y se aplican sendos filtros con $\lambda_c = 0.08mm$, mostrando tanto los perfiles de rugosidad como el de ondulación (caso filtro Gaussiano) y la línea media (caso 2RC).

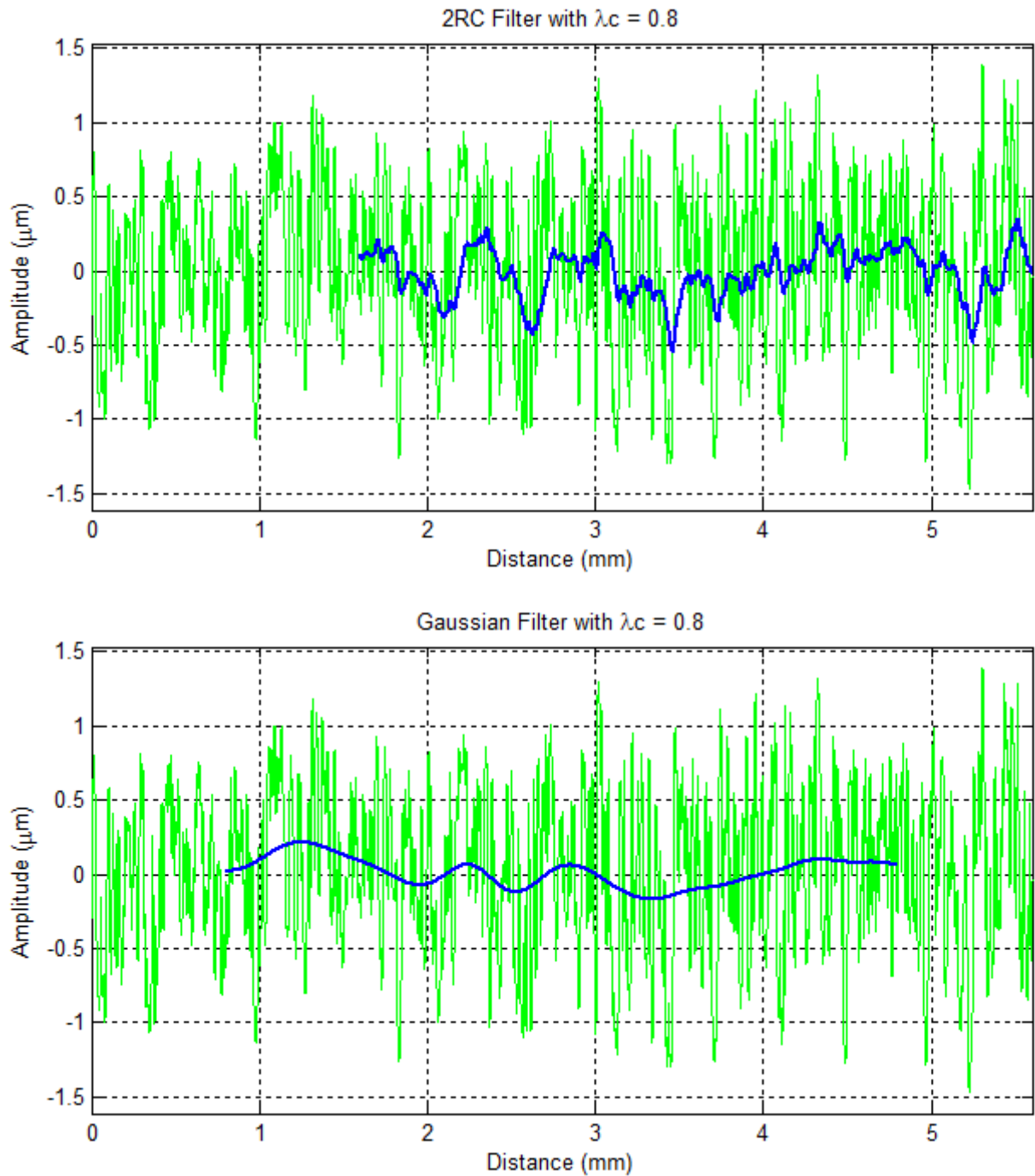


Figura 70. Comparación entre la línea media del filtro 2RC (arriba) y el perfil de ondulación del filtro Gaussiano (abajo) con $\lambda_c = 0.8mm$.

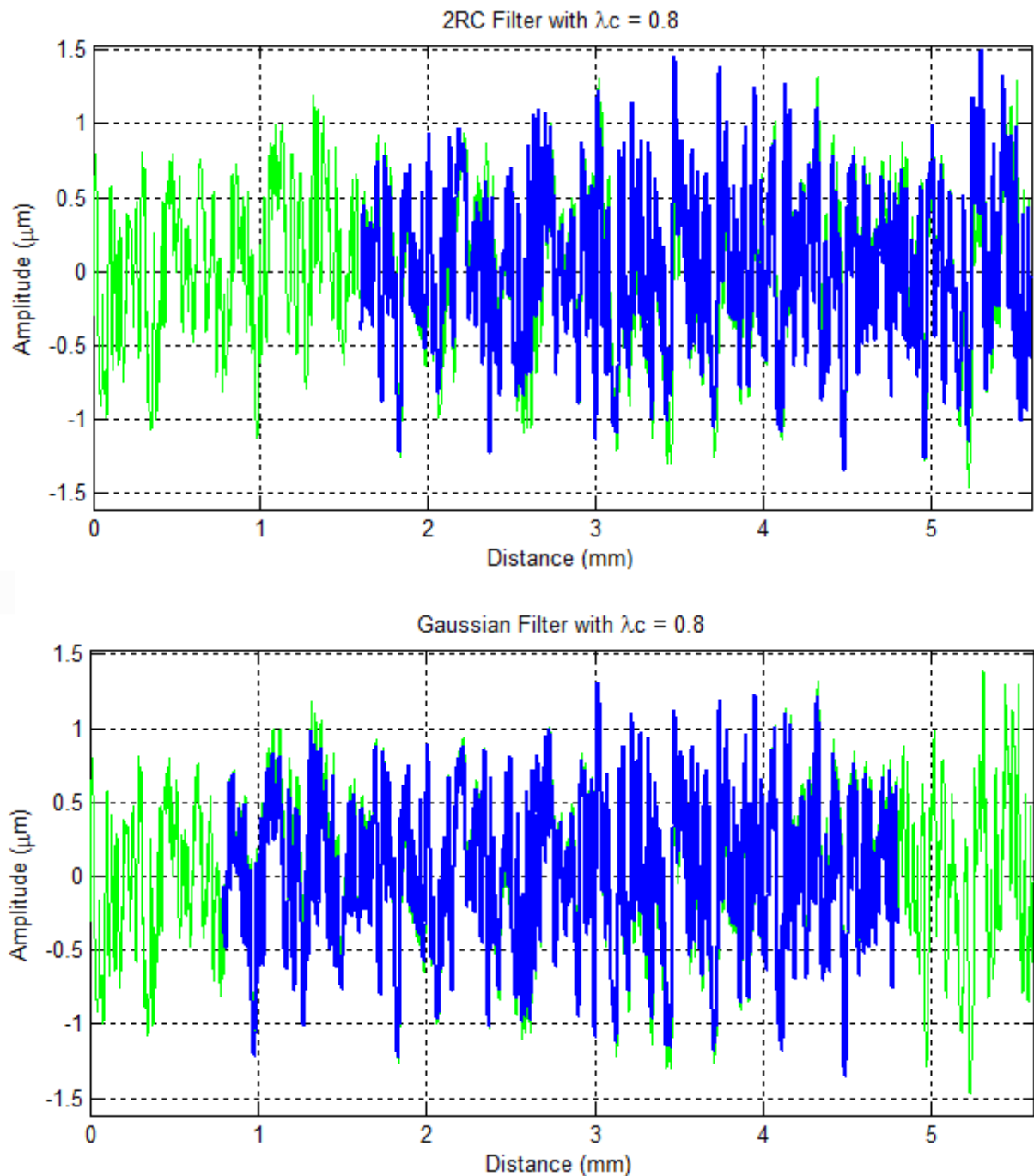


Figura 71. Comparación entre los perfiles de rugosidad generados con un filtro 2RC (arriba) y uno Gaussiano (abajo) con $\lambda_c = 0.8\text{mm}$.

Nótese que la línea media (que no perfil de ondulación) del filtro 2RC está desplazada en fase, mientras que el perfil de ondulación del filtro Gaussiano no lo está.

El perfil de rugosidad generado a partir del filtro 2RC, además de presentar distorsión debido a dicho desfase, es en general de mayor amplitud que el generado a partir del filtro Gaussiano, hecho debido a que la transmitancia del filtro 2RC en el corte es del 75% mientras que la del Gaussiano es del 50%.

5.5.4 Comparativa de resultados del módulo Filtro 2RC con el algoritmo de referencia del *NIST*

A continuación se muestra una comparativa gráfica entre los resultados obtenidos al aplicar un filtro 2RC al perfil *EDM.smd* en *VisualSR2D* y mediante el algoritmo de referencia del *NIST*.

Se ha utilizado un $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$ para obtener la línea media del perfil.

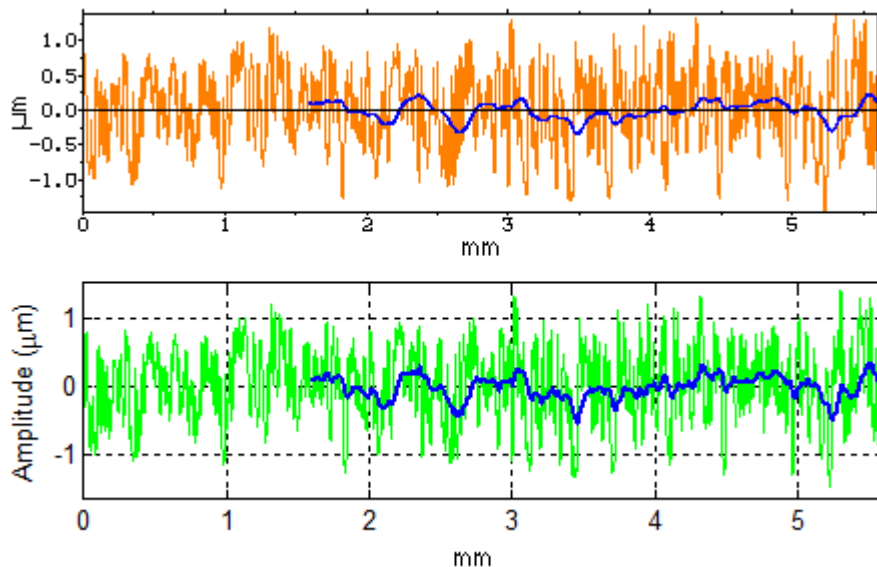


Figura 72. Comparación entre el filtro 2RC con $\lambda_c=0.8\text{mm}$ entre el *NIST* (arriba) y *VisualSR2D* (abajo).

Para llevar a cabo una comparación más formal pueden utilizarse los módulos de exportación de ambos *NIST* y *VisualSR2D* tal y como se explicó en la sección análoga del capítulo anterior. En el *NIST*, puede aplicarse el filtro y descargarse el perfil resultante en formato *.smd*, que puede compararse con el fichero *.smd* obtenido tras exportar el perfil filtrado en *VisualSR2D* de acuerdo a lo que se explicó en 5.3.5 *Implementación del módulo Filtrado en el Dominio de la Frecuencia y el módulo de exportación de perfiles filtrados en VisualSR2D*.

Obtenidos ambos ficheros *.smd*, pueden bien compararse directamente o bien utilizando alguna herramienta matemática para representarlos de forma simultánea.

5.6 FILTRADO Y PARAMETRIZACIÓN. ANÁLISIS DE RESULTADOS: *NIST* vs *VISUALSR2D*

En las secciones anteriores se han presentado comparativas a nivel local de cada módulo de *VisualSR2D* estudiado: parámetros, filtro FFT, filtro Gaussiano y filtro 2RC.

La combinación de los módulos de parametrización y filtrado supone el núcleo de *VisualSR2D*, ya que, si bien el programa incluye otros módulos diversos (véase 5.7 *Autocovarianza y Autocorrelación*, 5.8 *Densidad Espectral de Potencia* y 5.9 *Curva de Abbott – Firestone*), es aquí donde se juntan la implementación de la Norma ISO 5436, el estudio de acabado superficial, el tratamiento de ficheros *.smd* y las posibilidades de exportación.

Con el objetivo de analizar el potencial de *VisualSR2D* en este ámbito, van a compararse los resultados obtenidos tras un proceso de filtrado y análisis paramétrico con aquellos proporcionados por el algoritmo de referencia del *NIST*.

En concreto va a aplicarse un filtro 2RC con $\lambda_c = 0.8mm$ al ya conocido perfil *EDM.smd* para un obtener un perfil de rugosidad, va a dividirse el perfil en longitudes básicas de acuerdo a dicho valor de λ_c , y van a analizarse los parámetros de rugosidad *R* con referencia a dichas longitudes básicas.

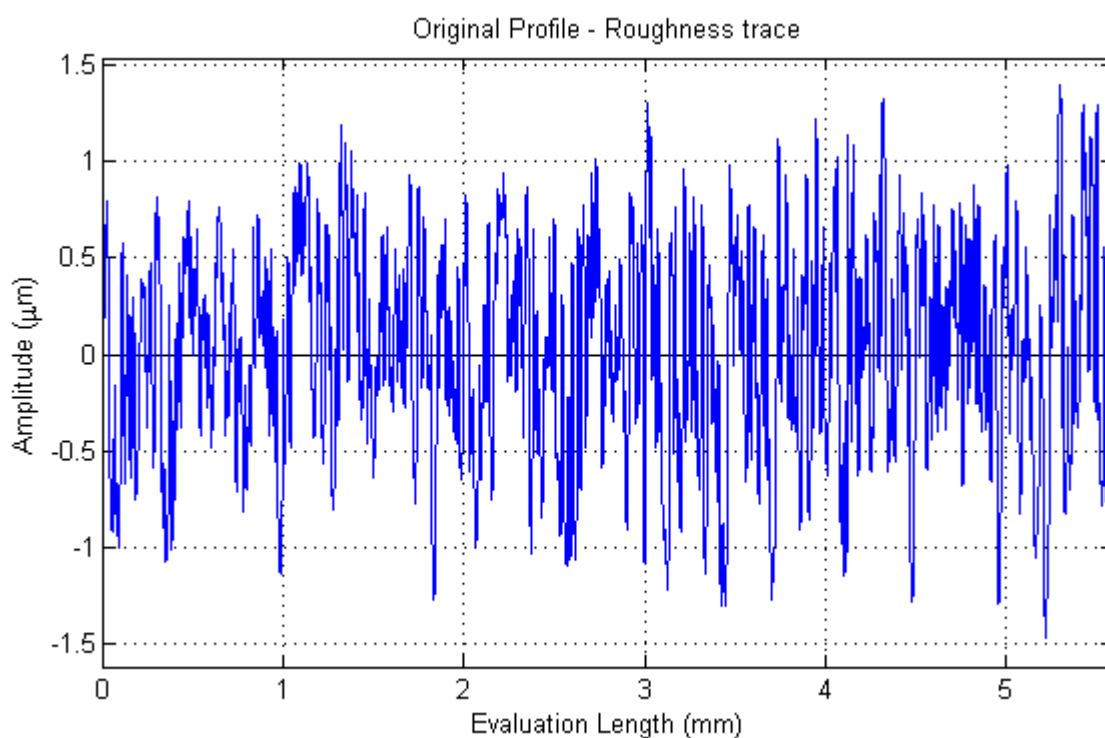


Figura 73. Perfil de rugosidad resultante de aplicar un filtro 2RC de $L_c=0.8mm$ a *EDM.smd*

Data information	
File Identifier:	EDM_2RC_Roughness
Revision Number:	ISO 5436-2:2001
Number of Points:	16001
Created by:	VisualSR2D

Figura 74. Información básica del perfil de rugosidad resultante de aplicar un filtro 2RC de $\lambda_c=0.8\text{mm}$ a EDM.smd. Nótese la reducción de puntos de 24001 del perfil original a 16001 en el perfil filtrado. Los 8000 puntos de diferencia corresponden a dos longitudes básicas que se pierden al aplicar el filtro, dado que $dx = 0.25\text{mm}$ en EDM.smd

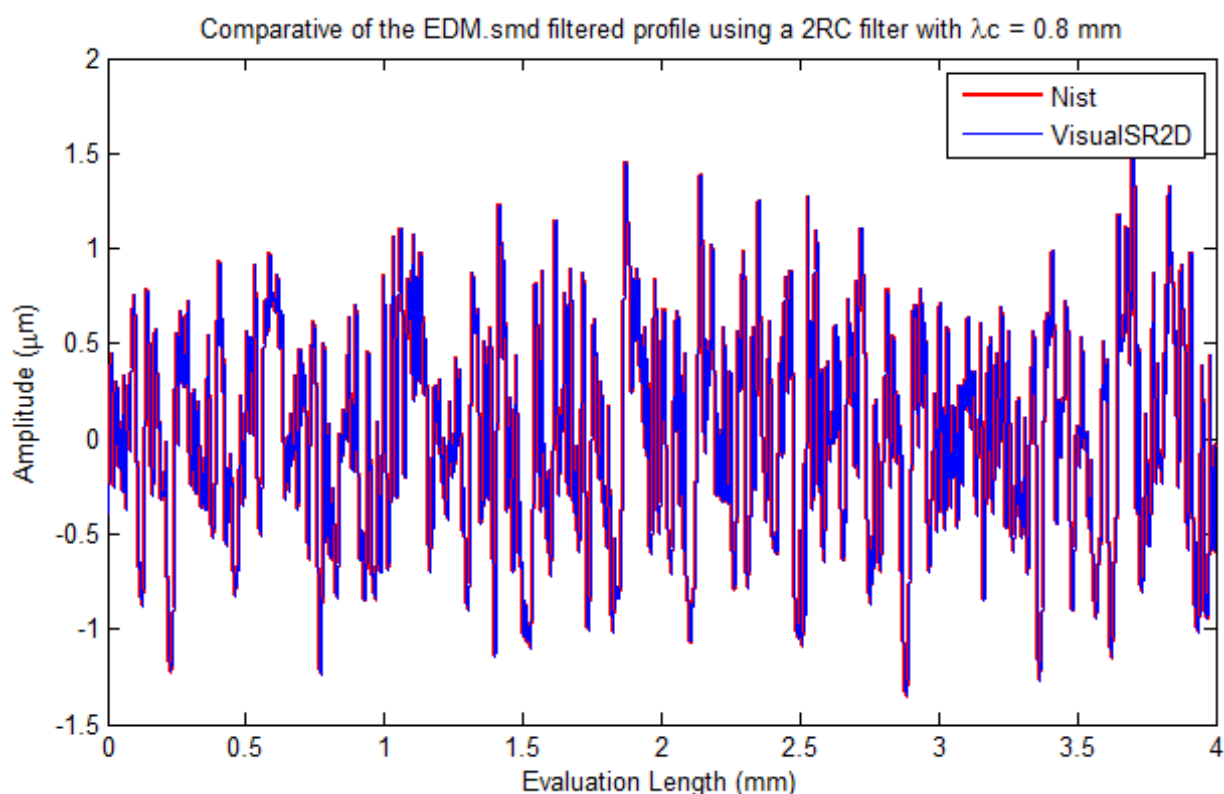


Figura 75. Gráfica comparativa entre los perfiles filtrados

Como punto de partida hay que resaltar que en este caso es improbable una coincidencia exacta de parámetros tal y como se obtuvo en la comparativa local del módulo de parámetros (véase 5.1.6 *Comparativa de Resultados del Módulo Parámetros con el NIST, Algoritmo de Referencia*), ya que en este caso existen múltiples fuentes de posibles discrepancias:

- Los perfiles filtrados obtenidos no son exactamente idénticos. Si bien se ha observado una tendencia general muy próxima al describir el filtro 2RC, el código del NIST es cerrado, y se desconoce si utilizan alguna técnica de corrección de fase, o cual es la definición exacta que hacen del filtro.

A la vista de la figura 76, estos errores son de aproximadamente un 0.2% en uno de los extremos, zona más crítica.

<pre> 1 ISO 5436-2:2001 NULEDM 2R 2 PRFNUL 0 ISO5436 NULCRLE 3 CXNUL INUL 16001 umNUL : 4 CZNUL ANUL 16001 umNUL : 5 ETXCRLE 6 DATE 10 June 2014 NULCRLE 7 TIME 18:52 NULCRLE 8 CREATED_BY VisualSR2D NUL 9 PROFILE_FILTER 2RC Lc 0.0 10 ETXCRLE 11 -0.33675621262008 CRLE 12 -0.361701264293409 CRLE 13 -0.360861863755915 CRLE 14 -0.37288793845306 CRLE 15 -0.384886535500499 CRLE 16 -0.383993826130594 CRLE 17 -0.395966575851912 CRLE 18 -0.395048117675705 CRLE 19 -0.381267465369451 CRLE 20 -0.380381550646366 CRLE 21 -0.379497263167483 CRLE 22 -0.365750724716268 CRLE 23 -0.364898759258975 CRLE 24 -0.351184488660438 CRLE 25 -0.350364736968167 CRLE 26 -0.34954655585595 CRLE 27 -0.348729889119333 CRLE </pre>	<pre> ISO 5436 - 1999 NULEDM NULCRLE PRFNUL 2 ISO5436 NULCRLE CXNUL INUL 16001 umNUL 1.0e0 DN CZNUL ANUL 16001 umNUL 1.0e0 DN ETXCRLE DATE 10 June 2014 NULCRLE TIME 13:06 NULCRLE CREATED_BY NIST Virtual Surface (ETXCRLE -0.33751722383271465 CRLE -0.36251864703925263 CRLE -0.3616773496006861 CRLE -0.37373060116152534 CRLE -0.385756312977888 CRLE -0.3848615862381045 CRLE -0.3968613923178277 CRLE -0.39594085858386097 CRLE -0.3821290643698122 CRLE -0.38124114763158234 CRLE -0.38035486181484734 CRLE -0.36657725854729284 CRLE -0.36572336779436565 CRLE -0.35197810529929485 CRLE -0.3511565011089676 CRLE -0.35033647104793586 CRLE -0.3495179587847323 CRLE </pre>
---	---

Figura 76. Comparación punto a punto del perfil filtrado, según VisualSR2D (izquierda) y el NIST (derecha). Nótese que el fichero resultante de la exportación tiene una línea más en VisualSR2D, la línea 9, con la información del filtro aplicado bajo la etiqueta PROFILE_FILTER.

- Definición de longitudes básicas del NIST desconocida.
- Algoritmo de cálculo de parámetros en función de longitudes básicas del NIST desconocido.

Amplitude Parameters

Ra (μm) = 0.46985 Rq (μm) = 0.56267
Rv (μm) = 1.2129 Rz (μm) = 2.4986
Rp (μm) = 1.2857

Spacing parameters

RSm (μm) = 38.141
Height Discrimination % Rz
Spacing Discrimination % sampling length

Shape parameters

Rsk = 0.0085584 Rku = 2.3171

Figura 77. Parámetros resultantes de aplicar un filtro 2RC de $L_c=0.8\text{mm}$ a EDM.smd para obtener un perfil de rugosidad en VisualSR2D. Se ha tomado como referencia para la evaluación de los parámetros las longitudes básicas.

Legend	<u>Roughness</u>
<u>P, W, Ra</u>	0.47094 μm
<u>P, W, Rq</u>	0.56399 μm
<u>P, W, Rsk</u>	0.00871
<u>P, W, Rku</u>	2.31678
<u>P, W, Rz</u>	2.50427 μm
<u>P, W, Rp</u>	1.28864 μm
<u>P, W, Rv</u>	1.21563 μm
<u>P, W, Rt</u>	2.86341 μm
<u>P, W, RSm</u>	38.65871 μm

Figura 78. Parámetros resultantes de aplicar un filtro 2RC de $L_c=0.8\text{mm}$ a EDM.smd para obtener un perfil de rugosidad según el NIST. Se ha tomado como referencia para la evaluación de los parámetros las longitudes básicas.

Tabla 13. Comparativa de resultados con un filtro 2RC y $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$

	VisualSR2D	NIST	Discrepancia (referencia NIST)
Ra	0,46985 μm	0.47094 μm	0,2315%
Rq	0,56267 μm	0.56399 μm	0,2340%
Rv	1,2129 μm	1,21563 μm	0,2246%
Rz	2,4986 μm	2,50427 μm	0,2264%
Rp	1,2857 μm	1,28864 μm	0,2281%
RSm	38,141 μm	38,65871 μm	1,3392%
Rsk	0,00856	0,00871	1,7405%
Rku	2,3171	2,3168	0,0138%

A la vista estos resultados puede concluirse que:

- El error de los parámetros de amplitud es similar al error obtenido durante el filtrado, luego parece no haber ambigüedad en la definición de las longitudes básicas o en el cálculo de parámetros en función de las mismas, y puede concluirse que la discrepancia en los parámetros viene de la discrepancia en el proceso de filtrado.
- Las discrepancias en los parámetros de forma son extremadamente bajas. Téngase en cuenta que aunque en *Rsk* el error aparente es de más de un 1% las cantidades a comparar son extremadamente pequeñas, difiriendo solo la diezmilésima.
- La diferencia en *RSm* es más bajo de lo que podría esperarse si se tienen en cuenta las consideraciones desarrolladas en la comparativa del módulo de parámetros (ver 5.1.6 *Comparativa de Resultados del Módulo Parámetros con el NIST, Algoritmo de Referencia*).

Repitiendo esta operación con otro tipo de filtro (Gaussiano) y con otro perfil se obtiene resultados similares, lo que parece indicar que al tener una longitud básica claramente definida los resultados se aproximan, y por tanto queda la duda de si el cálculo de *RSm* en el *NIST*, que ya se ha explicado que presenta errores, pudiera tomar una longitud básica de referencia aun cuando esta no ha sido definida para el cálculo de *RSm*.

Para entender este razonamiento recuérdese que los umbrales Superior e Inferior de este parámetro dependían de *Rz*, que a su vez depende de estas longitudes básicas.

Con objeto de estudiar esta discrepancia en los parámetros asociada al filtro utilizado, así como esta variación en *RSm* menor de lo esperada, se repite el

proceso considerando esta vez un perfil de rugosidad resultado de aplicar un filtro Gaussiano con $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$.

Tabla 14. Comparativa de resultados con un filtro Gaussiano y $\lambda_c = 0.8 \text{ mm}$

	<i>VisualSR2D</i>	<i>NIST</i>	Discrepancia (referencia <i>NIST</i>)
Ra	0.44964 um	0.44965 um	0.0022%
Rq	0.53899 um	0.53902 um	0.0056%
Rv	1.217 um	1.21702 um	0.0016%
Rz	2.3431 um	2.34313 um	0.0013%
Rp	1.1261 um	1.12611 um	0.0009%
RSm	39.8543 um	38.64056 um	3.1411%
Rsk	-0.11272	-0.11255	0.1510%
Rku	2.29310	2.29302	0.0035%

En este caso los errores en todos los parámetros excepto en *RSm* resultan despreciables, y en éste último el error sigue siendo muy bajo con respecto a lo obtenido en ya citada comparativa de parámetros. Teniendo además las discrepancias en la definición de este parámetro ya comentadas en dicho capítulo, el resultado también se considera aceptable para *RSm*.

La conclusión adicional de estas dos comparativas es que las discrepancias en la filtrado mediante filtro Gaussiano entre *VisualSR2D* y el algoritmo del *NIST* son menores que las que se obtienen aplicando un filtro 2RC. Como ya se ha comentado, esto puede deberse a que el *NIST* utilice técnicas de corrección de desfase al utilizar este último filtro.

A continuación se completa la tabla 14 añadiendo también los resultados dados por el software del *NPL*. El algoritmo del *PTB*, aun modificando el encabezado del fichero para adaptarse a su estándar, parece no poder trabajar con datos de tipo incremental y por tanto queda fuera de esta comparativa, puesto que el fichero analizado, *EDM.smd* presenta el eje X en formato incremental.

	<i>VisualSR2D</i>	<i>NIST</i>	<i>NPL</i>
Ra	0.44964 um	0.44965 um	0.44966 um
Rq	0.53899 um	0.53902 um	0.539018 um
Rv	1.2170 um	1.21702 um	1.21869 um
Rz	2.3431 um	2.34313 um	2.34601 um
Rp	1.1261 um	1.12611 um	1.12731 um
RSm	39.8543 um	38.64056 um	68.11839 um
Rsk	-0.11272	-0.11255	-0.11254
Rku	2.29310	2.29302	2.29304

5.7 AUTOCOVARIANZA Y AUTOCORRELACIÓN

5.7.1 Conceptos generales de las funciones ACV y ACF

La finalidad del módulo *Correlation* de *VisualSR2D* es determinar cómo de repetitivo es un perfil. Para ello, el perfil es comparado con una copia de sí mismo desplazada en fase en pequeñas cantidades. Los conceptos de funciones de autocovarianza y de autocorrelación juegan papeles clave en este módulo, y son tratados a continuación.

Es precisamente la función de autocovarianza (ACV, de *Autocovariance Function*) la que permite determinar dicha repetitividad, véase ASME B46.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2002). Para ello, una copia del perfil es superpuesta al original y un coeficiente es calculado como suma de la multiplicación de cada uno de los elementos de ambos perfiles. Hecho esto se desplaza el nuevo perfil una cierta cantidad y vuelven a calcularse estos coeficientes. El conjunto de estos coeficientes en función de la distancia que se ha desplazado el perfil original forma la función de autocovarianza ACV.

Formalmente, la función de autocovarianza ACV es definida mediante la integral del producto del perfil original y el perfil desplazado a lo largo de la longitud de evaluación del perfil. Para perfiles discretos con los que trabaja *VisualSR2D* se tiene que:

$$ACV(k) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^{n-k} z(j)z(j+k), 0 \leq k \leq n-1$$

A medida que la copia del perfil original es desplazada, el área de superposición disminuye. La ecuación anterior tiene en cuenta este efecto de forma que su amplitud decae a medida que el perfil copia es desplazado, y por tanto es llamada *autocovarianza sesgada* (del inglés, *biased autocovariance*) (Muralikrishnan & Raja, 2009). La función ACV no sesgada se determinaría como:

$$ACV(k) = \frac{1}{n-k} \sum_{j=1}^{n-k} z(j)z(j+k), 0 \leq k \leq n-1$$

La función ACV resultante en este caso contiene n elementos y su representación es denominada *lado-derecho* debido a que el perfil duplicado es desplazado desde la zona de máxima superposición (fase cero) a lo largo de una única dirección (hacia la derecha) hasta que la superposición es nula. Cuando éste perfil es desplazado en la dirección opuesta se obtiene el *lado-izquierdo* de la función ACV, que puede ser generado a partir de:

$$ACV(k) = \frac{1}{n+k} \sum_{j=1-k}^n z(j)z(j+k), -n+1 \leq k \leq -1$$

Una combinación del *lado-derecho* y el *lado-izquierdo* dará como resultado la función ACV completa para cualquier perfil.

La función de autocorrelación (ACF, de *Autocorelation Function*), es la función de autocovarianza ACV normalizada con el cuadrado del parámetro Rq :

$$ACF(k) = \frac{ACV(k)}{Rq^2}$$

El uso de la función de autocorrelación ACF para describir y clasificar superficies fue descrito por primera por Peklenik (Peklenik, 1967).

En la práctica los perfiles son superpuestos únicamente un valor de hasta aproximadamente el 10% de sus longitudes debido a que cualquier desviación mayor suele resultar en rápidas disminuciones de la función de autocovarianza ACV.

Para entender mejor el funcionamiento y la interpretación del módulo de correlación de *VisualSR2D* se considera un ejemplo con un perfil en forma de coseno, ver figura 79.

La representación de la función de autocorrelación ACF calculada a partir de la autocovarianza sesgada se muestra asimismo en la figura 80.

Un hecho interesante es la evidente periodicidad que puede observarse en la figura 80. A medida que aumenta la distancia que es desplazado el perfil, la correlación disminuye hasta que dicha fase es un múltiplo de $\pi/2$, momento en el que el perfil duplicado es una copia idéntica del original y la función de autocorrelación ACF tiende a 0. Es también evidente que el periodo de esta función es el mismo que el del perfil original.

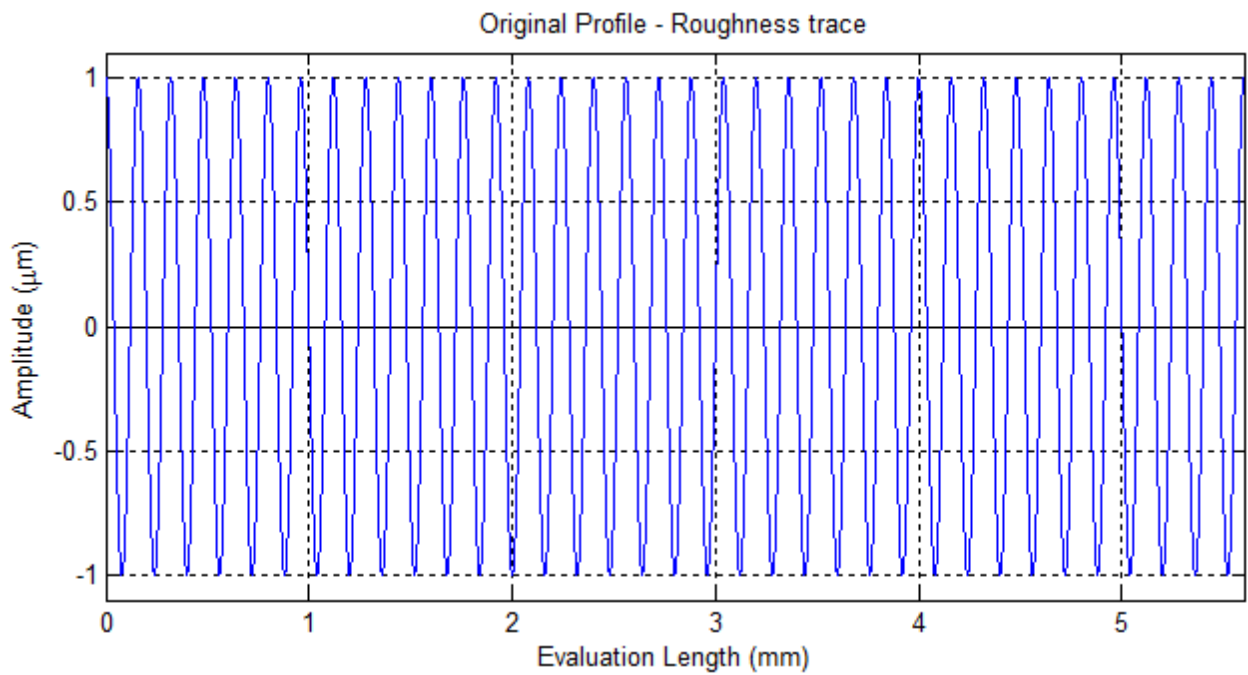


Figura 79. Perfil cosenoidal en VisualSR2D

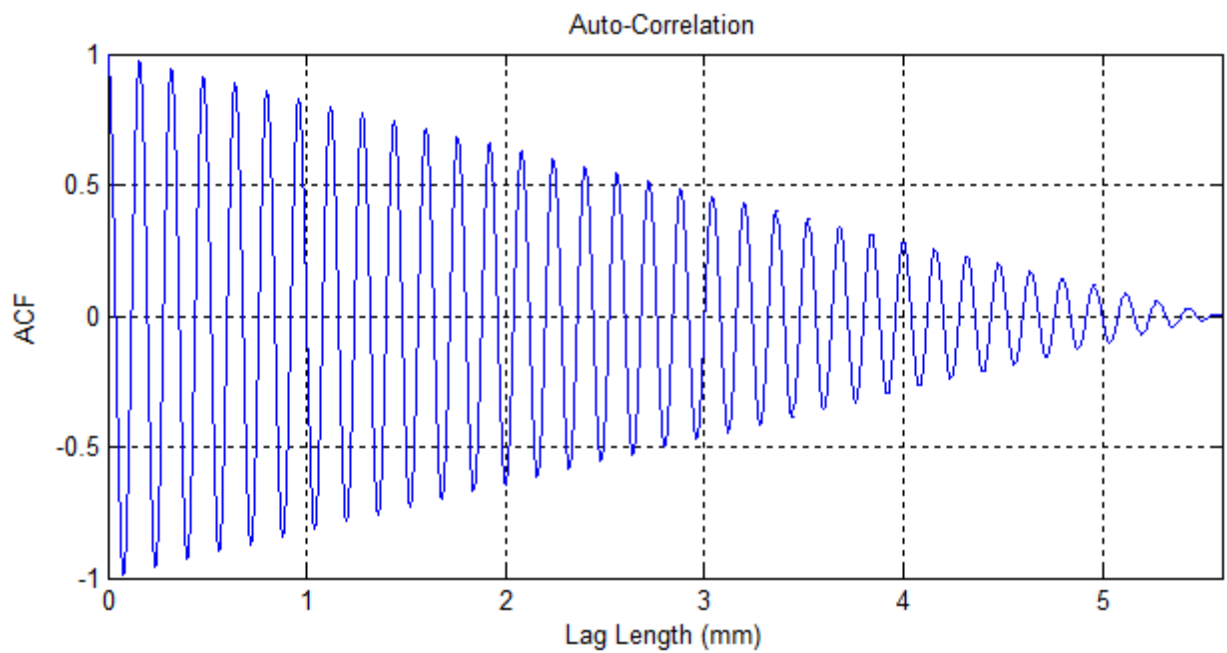


Figura 80. Función ACF sesgada de un perfil cosenoidal

La amplitud de la función de autocorrelación ACF disminuye a medida que el desfase entre los dos perfiles aumenta porque las áreas de superposición de ambos son cada vez menores debido a que estos perfiles son finitos. Si se tratase de perfiles infinitos la amplitud no decaería con el desfase. Esto es recogido por las funciones ACF basadas en funciones de autocovarianza no sesgadas, y se

ejemplifica en la figura 81 a partir de la construcción de una función no sesgada *lado-derecho*.

Aunque la discusión aquí presentada puede resultar útil para comprender la gráfica de la función de autocorrelación ACF, la realidad es que esta función no suele utilizarse para perfiles periódicos tales como senos o cosenos.

De hecho, su principal utilidad es la de capturar periodicidades ocultas en perfiles aleatorios. Como ejemplo pueden citarse aquellos perfiles obtenidos mediante muelas de rectificado, en los que existe cierta relación entre el perfil obtenido y la estructura granular de dicha muela (Whitehouse, 1994).

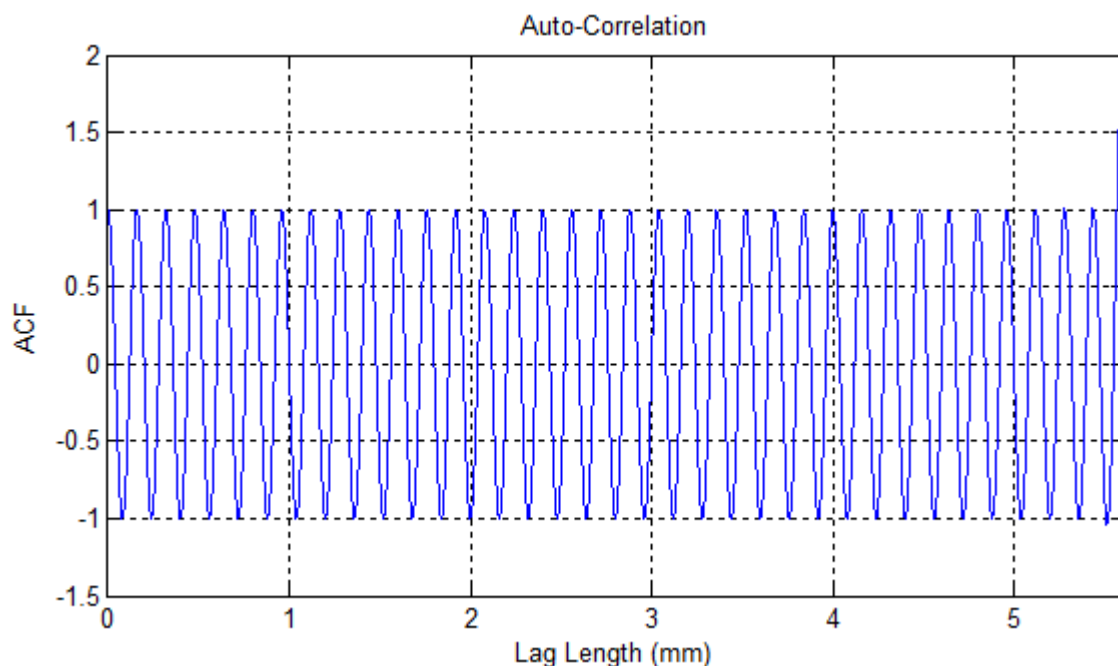


Figura 81. Función ACF no sesgada lado-derecho de un perfil cosenoidal

Para perfiles periódicos la Densidad Espectral de Potencia (del inglés *Power Spectral Density, PSD*), que será discutida en un capítulo posterior, resulta más útil.

5.7.2 Implementación del módulo *Correlation* en *VisualSR2D*

El proceso de cálculo de la función de autocorrelación ACF en *VisualSR2D* se realiza exclusivamente en el dominio espacial, a través de las funciones descritas en 5.8.1 *Conceptos generales sobre la Densidad Espectral de Potencia*.

Las posibilidades ofrecidas son todas aquellas comentadas a lo largo de la descripción de dichas funciones:

- *Biased Autocovariance* (Autocovarianza sesgada)

- *Right-side* (Lado-derecho)
- *Left-side* (Lado-izquierdo)
- *Right- and left-side* (composición de los lados izquierdo y derecho)

Adicionalmente se ofrece la posibilidad de limitar el desfase del perfil duplicado, *Lag Length*. Si este valor es 0 o se deja por defecto se evaluará la longitud total del perfil. Como se dijo anteriormente, lo normal es limitarlo a aproximadamente el 10% de la longitud del perfil original, ya que, para perfiles aleatorios, a partir de dicho valor suele producirse una gran caída en los valores de la función de autocovarianza ACV.

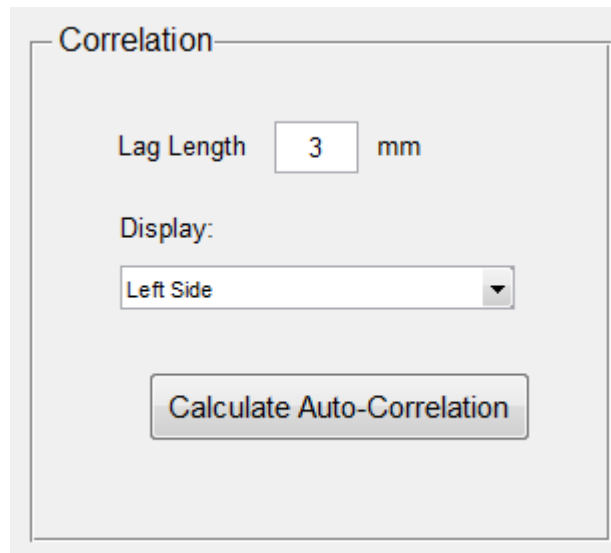


Figura 82. Interfaz gráfica del módulo Correlation en VisualSR2D

5.7.3 Comparativa de resultados del módulo Correlación con el algoritmo de referencia del *NIST*

De forma similar a lo que se hizo en los apartados de estudio de técnicas de filtrado, se presenta a continuación una comparativa entre los resultados obtenidos en el módulo *Correlation* del *NIST* y de *VisualSR2D*.

El algoritmo del *NIST* no ofrece la posibilidad de computar los resultados a partir de la función de autocovarianza ACV sesgada, ni tampoco a partir del lado-izquierdo, por lo que a continuación se comparan únicamente los casos restantes.

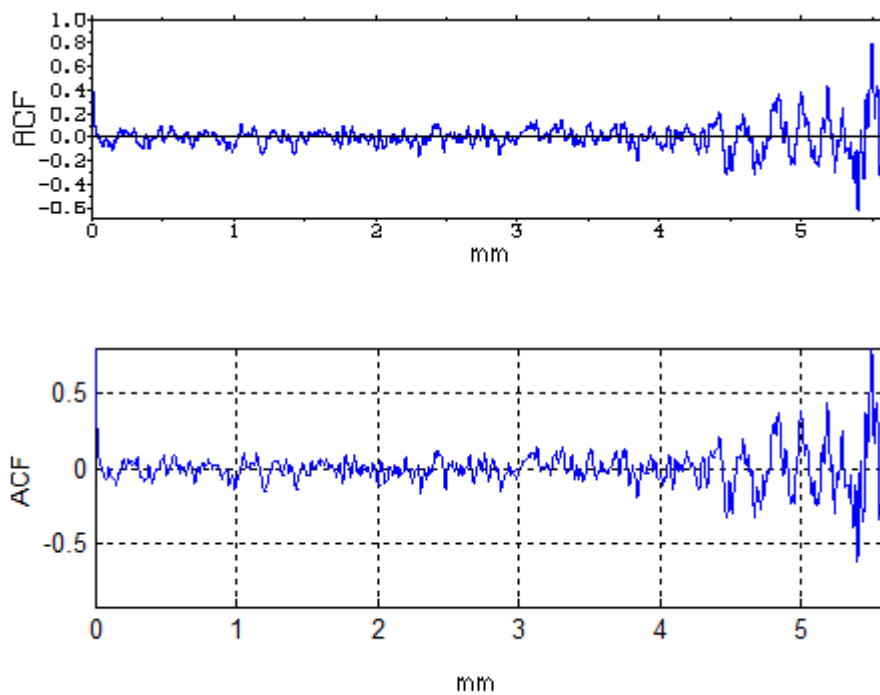


Figura 83. Comparativa de la ACF right-side según NIST (arriba) y VisualSR2D (abajo)

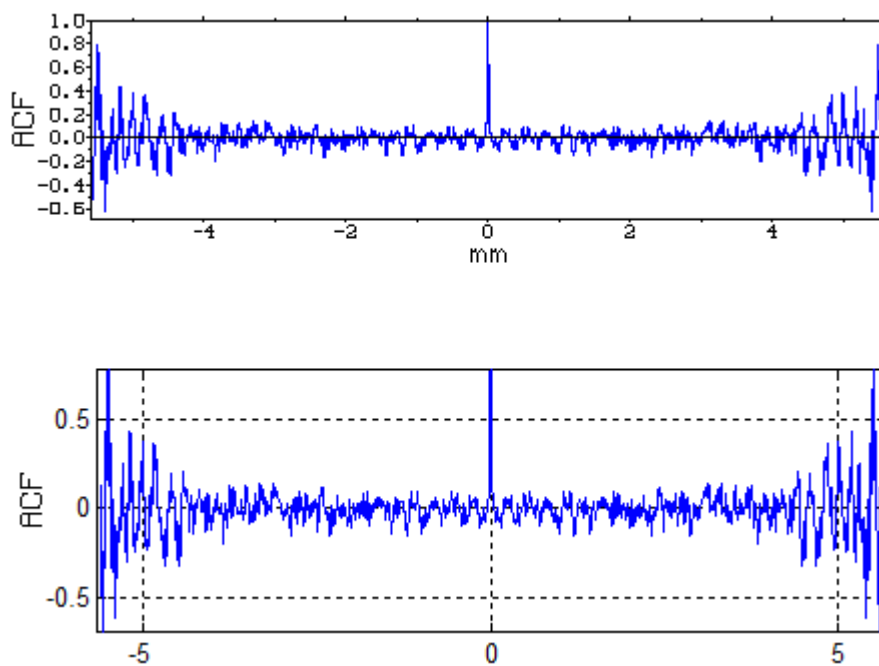


Figura 84. Comparativa de la ACF right and left side según NIST (arriba) y VisualSR2D (abajo)

Un análisis más riguroso puede llevarse a cabo comparando cada uno de los puntos que conforman dichas gráficas utilizando los módulos de exportación que tanto el *NIST* como *VisualSR2D* incorporan.

Nótese no obstante que a diferencia de los módulos de filtrado, que disponían de una función de exportación propia a ficheros *.smd*, los módulos de este capítulo carecen una función similar. La razón es que los ficheros *.smd* que describe la Norma ISO 5436 están enfocados al tratamiento de perfiles o superficies superficiales, y carecería de sentido práctico utilizar este mismo sistema para exportar funciones como la ACF, cuyo significado físico es completamente distinto.

De hecho, la alternativa que ofrece el *NIST* para exportar el tipo de datos que se manejan en los módulos de correlación, *PSD* y *BAC* es la generación de un archivo no estandarizado *.xml*, en el que incluyen información del perfil original en una forma similar pero no igual a un archivo *.smd* estándar, pero añadiendo también al final de dicho archivo *.xml* los datos de éstos módulos.

La alternativa existente en *VisuaSR2D* es exportar la figura que contiene la gráfica, de forma que puedan obtenerse los vectores que la forman de forma sencilla utilizando MATLAB y, a partir de ahí, realizar una comparación con los resultados del *NIST*, por ejemplo cargándolos también en MATLAB.

5.8 DENSIDAD ESPECTRAL DE POTENCIA

5.8.1 Conceptos generales sobre la Densidad Espectral de Potencia

La Densidad Espectral de Potencia (en adelante PSD, del inglés Power Spectral Density) es el cuadrado de la transformada de Fourier del perfil, normalizado convenientemente (American Society of Mechanical Engineers, 2002). Para un perfil discreto z cuya transformada de Fourier es zf la PSD viene dada por:

$$PSD(f) = \frac{\Delta x}{n} |zf(f)|^2$$

Donde:

- f es la frecuencia espacial (recíproco de la longitud de onda espacial)

$$f = k/l$$

- k un entero entre 1 y $n/2$
- n es el número de puntos del perfil discreto
- l es la longitud de evaluación del perfil discreto

A partir de su definición es fácil demostrar que el área bajo la curva de la PSD es igual a Rq^2 .

Otra forma de calcular la PSD es a partir de la transformada de Fourier de la función de autocovarianza ACV.

La PSD es utilizada cuando se desea definir una superficie con un nivel de información más alto que el que los parámetros individuales ya estudiados pueden proporcionar. Se enmarca de esta forma dentro de los llamados métodos estadísticos, que proporcionan un conjunto de números (que admiten representación gráfica) para la caracterización de acabados superficiales (NIST, 2010).

Para entender mejor como la PSD ayuda a caracterizar perfiles, considérese un perfil sinusoidal distorsionado mediante un ruido gaussiano de $6dB$, ver figura 85. El perfil ha sido generado desde uno sinusoidal puro con valores del eje horizontal x entre 0 y $2\pi \text{ mm}$ y $z = \sin(10x)$, cuya frecuencia espacial es 1.591 1/mm y su longitud de onda característica de 0.628 mm .

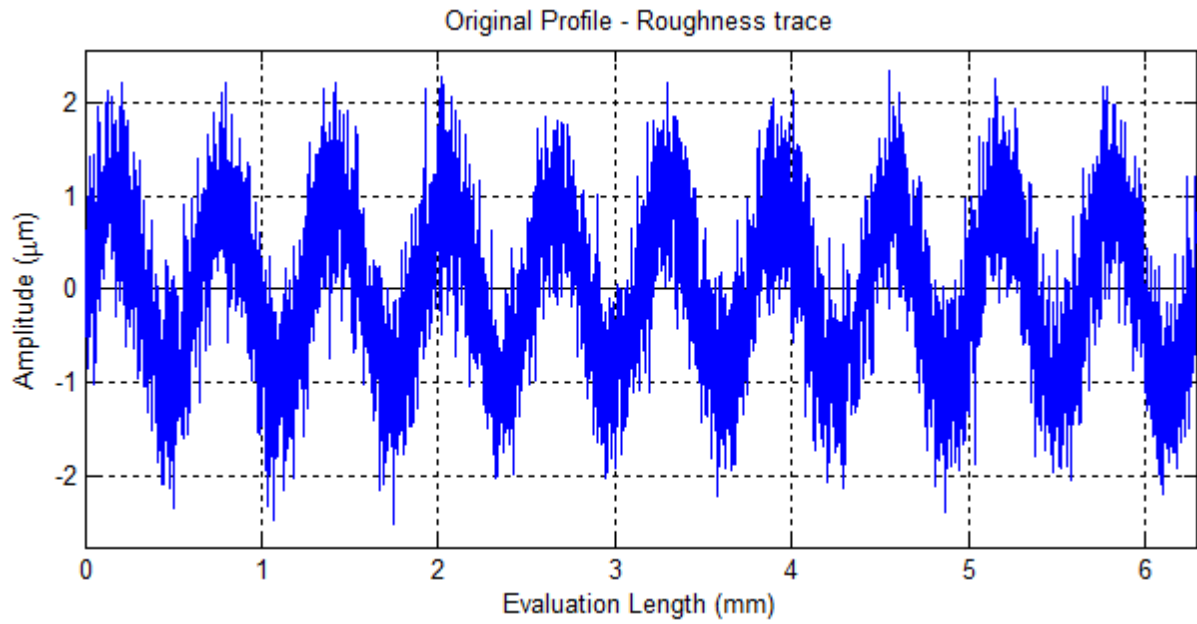


Figura 85. Perfil sinusoidal distorsionado mediante un ruido gaussiano de 6dB

En una escala doblemente logarítmica, la PSD del perfil anterior se muestra en la figura 86.

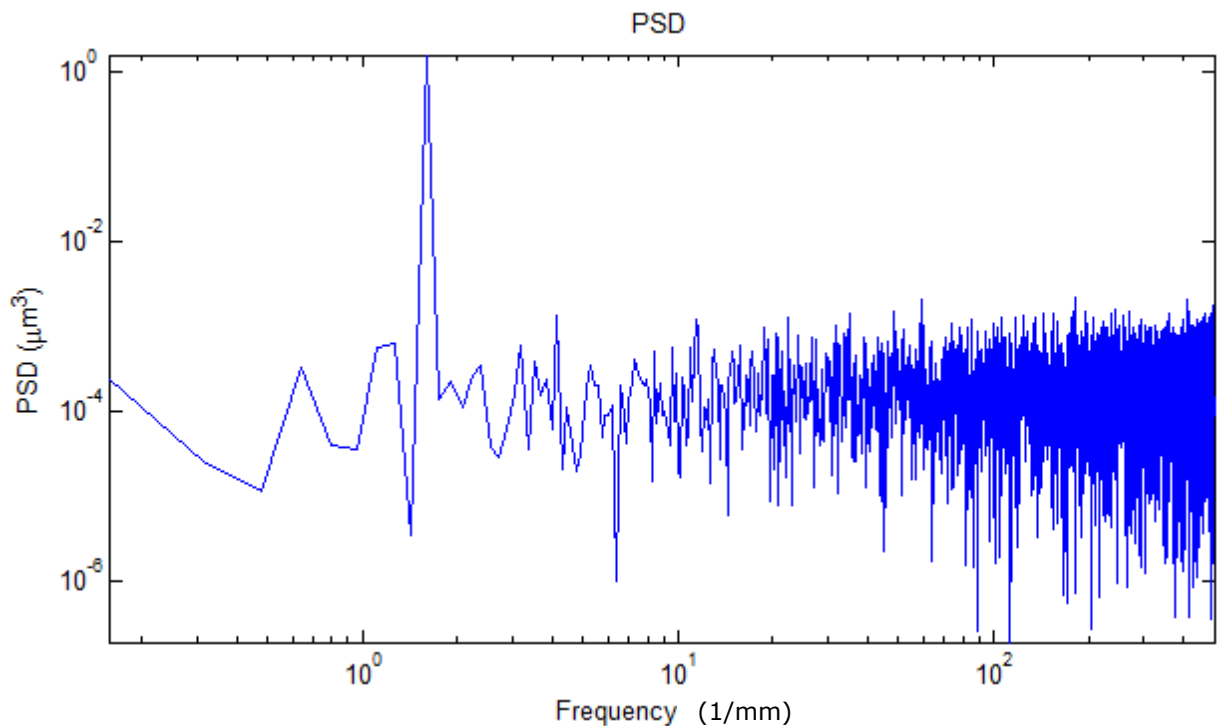


Figura 86. PSD de un perfil sinusoidal distorsionado mediante un ruido gaussiano de 6dB

La figura 87 muestra que hay una frecuencia privilegiada, que resulta ser $1.591 \text{ } 1/\mu\text{m}$, frecuencia espacial del perfil sin distorsionar, y que corresponde a una longitud de onda característica de $0.628 \mu\text{m}$. Puede observarse que el ruido

generado es de alta frecuencia, pues el peso restante de la PSD (insignificante comparado con el de la componente principal) se concentra en frecuencias muy altas.

En el perfil original, sin distorsión, es obvio que solo habrá un pico a su frecuencia propia.

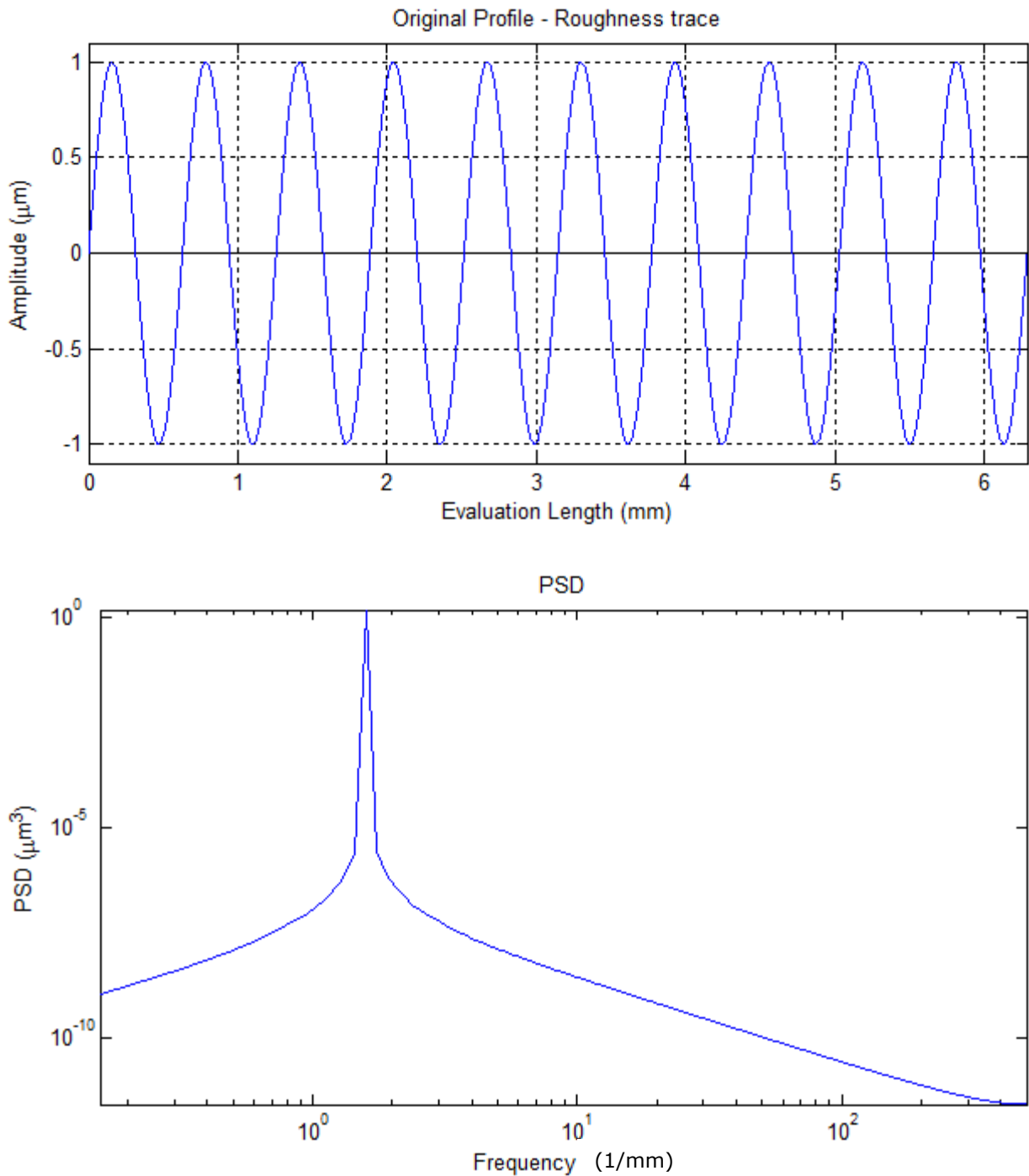


Figura 87. Perfil $z = \sin(10x)$ con x entre 0 y 2π (arriba) y su PSD (abajo)

La PSD del perfil distorsionado contiene mucho ruido concentrado en a altas frecuencias debido al tipo de distorsión generada y que la muestra tenía una longitud finita. En general, no obstante, la PSD es en su mayor parte una función monótona decreciente. Esto es, a medida que la longitud de onda va volviéndose más corta (frecuencia mayor), la amplitud de la PSD disminuye, lo que supone el comportamiento típico de la mayoría de superficies con operaciones de acabado superficial.

Adicionalmente, es normal que la función contenga picos y valles muy pronunciados en las cercanías de $\lambda = \infty$, generalmente debido a los filtros de baja frecuencia en los instrumentos de medida.

5.8.2 Implementación del módulo PSD en *VisuaSR2D*

VisuaSR2D calcula de dos formas diferentes la Densidad Espectral de Potencia:

- Método *Mixed Radix FFT*: Se basa en transformar al dominio de frecuencia la señal (perfil) original y calcular la PSD a partir de la definición proporcionada en 5.8.1 *Conceptos generales sobre la Densidad Espectral de Potencia*. Por otro lado, se construye la escala de frecuencias del perfil.
- Método *FFT Zero Padding*: En este caso, antes de realizar la transformada de Fourier del perfil original, se le añaden ceros por detrás al vector que lo contiene.

El efecto que tiene añadir ceros antes de pasar al dominio de la frecuencia es similar a una interpolación (Smith, 2007). Nótese que esto implica que el resultado obtenido mediante este método no será idéntico al anterior, y que, en general, será más suave.

Concretamente *VisuaSR2D* añade tantos ceros al vector que contiene el perfil como puntos tiene dicho vector, tanto por delante como por detrás, resultando que el vector a utilizar en este método es tres veces mayor que el original.

Adicionalmente, y emulando las funciones del *NIST*, *VisuaSR2D* ofrece al usuario la posibilidad de utilizar ciertas ventanas. Las ventanas son funciones matemáticas usadas con frecuencia en el estudio y el procesamiento de señales para evitar las discontinuidades al principio y al final de los bloques analizados. Las distintas ventanas que *VisuaSR2D* incorpora son:

- Ventana Rectangular: Es la ventana más simple, equivalente a reemplazar todos los valores de la entrada excepto un cierto número N por ceros. Por tanto, el peso asignado a estos N valores es:

$$w(n) = 1$$

A efectos prácticos, dado que en *VisualSR2D* estos N valores son los números de puntos del perfil, esta ventana no realiza altera los resultados que se obtiene con el perfil original, y por tanto está determinada como la ventana por defecto.

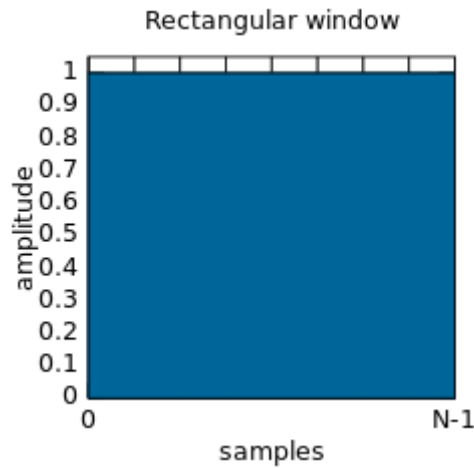


Figura 88. Ventana Rectangular

- Ventana de Hann: La función de peso para los puntos del perfil es:

$$w(n) = 0.5 \left(1 - \frac{\cos(2\pi n / (N-1))}{N-1} \right)$$

Nótese que en este caso sí que está aplicándose una atenuación a los extremos de la señal. A efectos de acabado superficial, esto implica que para obtención de la Densidad Espectral de Potencia *PSD* los puntos extremos del perfil original tienen menor peso que los centrales.

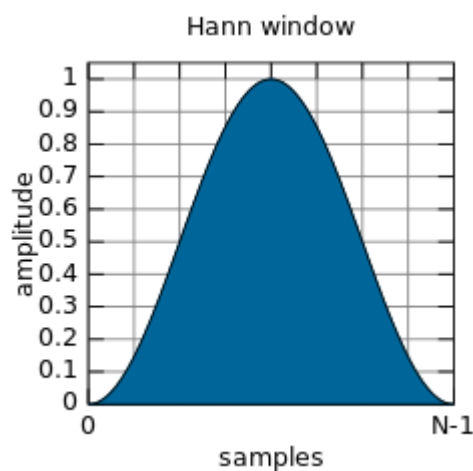


Figura 89. Ventana de Hann

- Ventana de Hamming: Esta ventana está optimizada para minimizar (o cancelar) el más grande de los lóbulos laterales, asignándole una altura de aproximadamente un quinto de la que asignaba la ventana de Hann. Su función de peso viene dada por:

$$w(n) = \alpha - \beta \cos\left(\frac{2\pi N}{N-1}\right)$$

Con $\alpha = 0.54$ y $\beta = 1 - \alpha = 0.46$.

Nótese que la expresión anterior es una generalización de ambas ventanas de Hann y de Hamming. Mientras que en la ventana de Hann ambos coeficientes α y β eran igual a la unidad, en la de Hamming son los ya indicados.

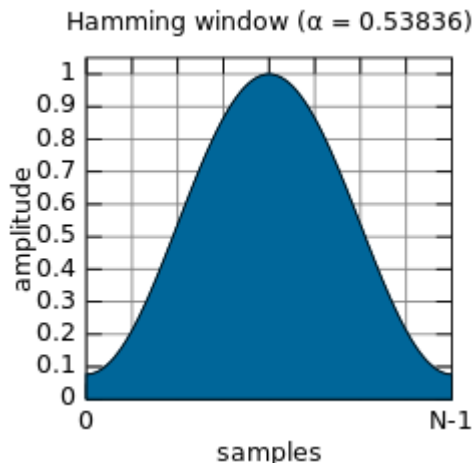


Figura 90. Ventana de Hamming

- Ventana de Blackman: La función de peso de la señal de entrada viene dada en este caso por:

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi N}{N-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi N}{N-1}\right)$$

Y $a_0 = (1 - \alpha)/2$, $a_1 = 0.5$ y $a_2 = \alpha/2$, con $\alpha = 0.16$ por convención si únicamente se habla de ventana de Blackman.

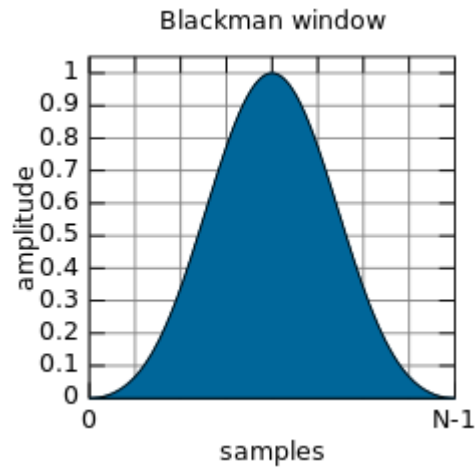


Figura 91. Ventana de Blackman

Finalmente, *VisualSR2D* permite elegir el tipo de ejes a utilizar en la representación de la PSD, lo que es importante de cara a su interpretación, pues sus variaciones suelen recogerse mejor con escalas logarítmicas o mixtas. Las escalas ofrecidas son:

- Logarítmica – logarítmica.
- Logarítmica – lineal.
- Lineal – logarítmica.
- Lineal – lineal.

Figura 92. Vista general de la interfaz gráfica del módulo PSD de *VisualSR2D*

5.8.3 Comparativa de resultados del módulo Densidad Espectral de Potencia con el algoritmo de referencia del *NIST*

A continuación vuelve a presentarse una comparativa de resultados entre el módulo PSD del *NIST*, algoritmo de referencia durante el desarrollo de *VisualSR2D* y el propio *VisualSR2D*. Para ello, vuelve a utilizarse en este caso el perfil *EDM.smd*, también obtenido de la página del *NIST*.

Comenzando con el método *Mixed Radix FFT*, se han seleccionado dos ventanas distintas, rectangular y Hann, para la comparación de resultados, que puede observarse en las figuras 93 y 94.

En cuanto al segundo método considerado en *VisualSR2D*, *Zero-Padding*, debe tenerse en cuenta que el *NIST* no proporciona información sobre la cuantía de ceros que añade al perfil. *VisualSR2D* añade por defecto tantos ceros por delante y por detrás como puntos tiene el perfil, de forma que el tamaño del vector tras aplicar dicha operación es tres veces mayor que el original.

La conclusión es que en este caso, si bien los resultados son muy parecidos como puede observarse en la figura 95, no son idénticos, ya que el hecho de que el algoritmo del *NIST* pueda estar añadiendo un número distinto de ceros a los que añade *VisualSR2D* modificaría la interpolación del perfil, haciendo éste más o menos suave, como puede observarse en la citada figura, en la que se ha usado en ambos casos una ventana de Blackman.

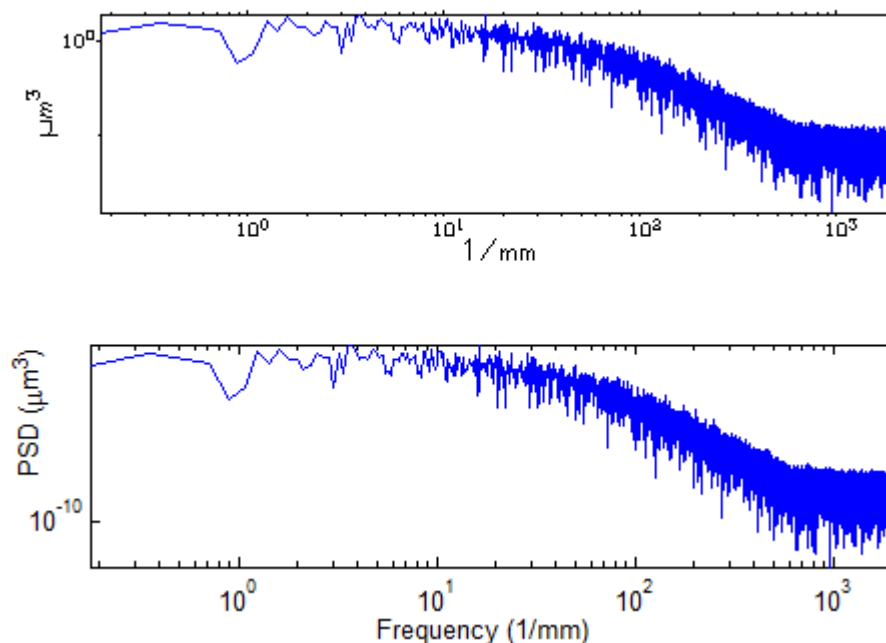


Figura 93. Comparación entre las PSD del perfil *EDM.smd* mediante el método *Mixed Radix FFT* utilizando una ventana rectangular según el *NIST* (arriba) y *VisualSR2D* (abajo).

Se hace referencia a las consideraciones tratadas en 5.7.3 *Comparativa de resultados del módulo Correlación con el algoritmo de referencia del NIST*; si deseara realizarse una comparación más rigurosa mediante los puntos de ambas gráficas utilizando los módulos de exportación del *NIST* y *VisualSR2D*.

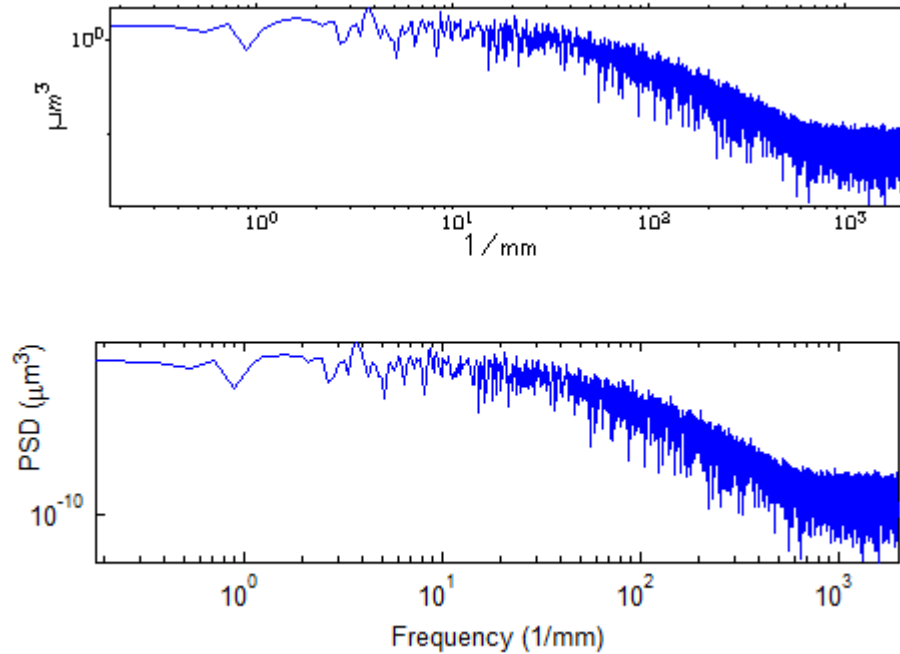


Figura 94. Comparación entre las PSD del perfil EDM.smd mediante el método Mixed Radix FFT utilizando una ventana de Hann según el NIST (arriba) y VisualSR2D (abajo).

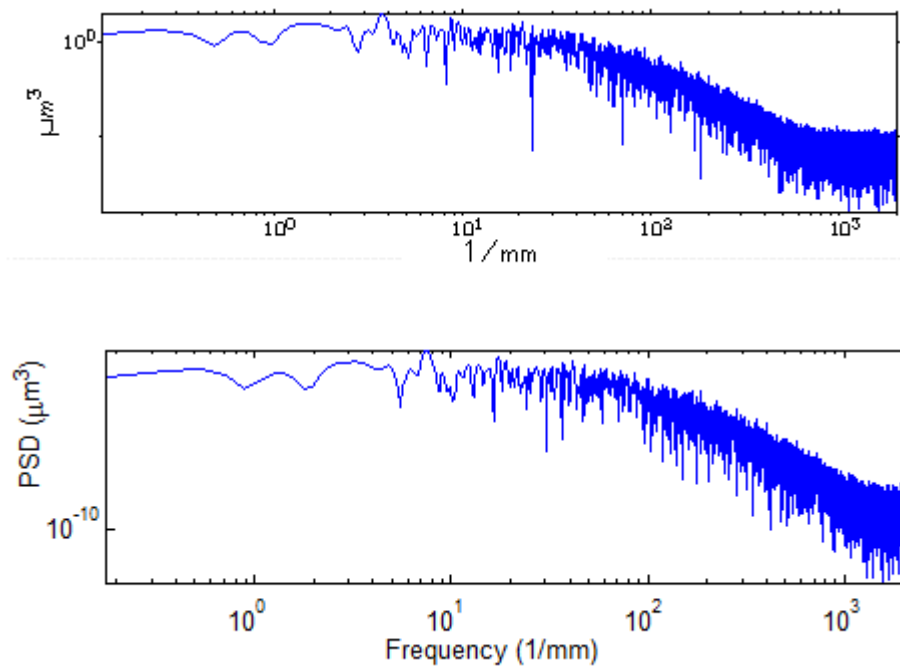


Figura 95. Comparación entre las PSD del perfil EDM.smd mediante el método Zero-Padding utilizando una ventana de Blackman según el NIST (arriba) y VisualSR2D (abajo).

5.9 CURVA DE ABBOTT – FIRESTONE

5.9.1 Curva de Abbott – Firestone: base teórica

Previo al concepto de curva de Abbott – Firestone es necesario introducir el de Función de Densidad de Amplitud (ADF, del inglés *Amplitude Density Function*). La ADF es el histograma del perfil, calculado sobre la longitud del evaluación del mismo, tal y como se define en los estándares ASME B46.1 (American Society of Mechanical Engineers, 2002).

Para obtener la ADF el rango vertical del perfil, esto es, el segmento que va del valor mínimo al valor máximo del mismo, es dividido en q celdas (*bins* en inglés). El número de puntos del perfil contenido en cada una de dichas celdas en función de la localización vertical de la misma es el histograma del perfil, que calculado sobre la longitud de evaluación es la función ADF.

En la literatura española la Función de Densidad de Amplitud ADF también se denomina Longitud Portante del perfil, y si está adimensionalizada con la longitud de evaluación se le denomina Tasa de Perfil Portante $R_{mr}(d)$.

Una definición alternativa para esta Tasa de Perfil Portante es la siguiente: para una altura c , medida a partir del punto más alto del perfil, la tasas de perfil portante es el cociente, expresado en tanto por ciento, entre la longitud de intersección del perfil con una línea paralela a la dirección general del perfil y la longitud de evaluación.

$$R_{mr}(d) = \sum \frac{l_i(d)}{l_m} \cdot 100\%$$

Los conceptos anteriores son análogos, si bien la explicación de ADF está enfocada al campo discreto y es la forma en que se ha introducido en *VisualSR2D*, mientras que la definición de Tasa de Perfil Portante aquí proporcionada sería aplicable de forma directa a perfiles continuos ya que, para perfiles discretos, serían necesarias interpolaciones adicionales.

La figura 96 ejemplifica la función ADF de forma cualitativa.

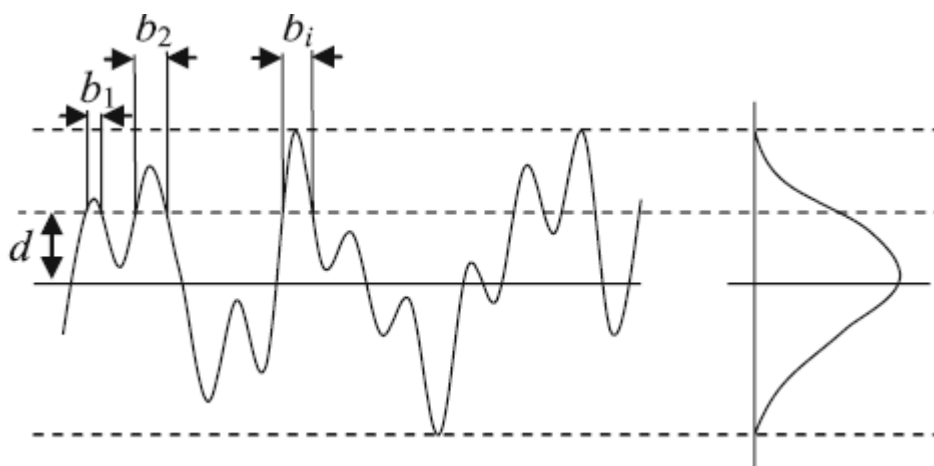


Figura 96. Ejemplo de un perfil (izquierda) y su función de densidad de amplitud ADF (derecha)

Ahora bien, si el anterior concepto de función ADF es empleado de forma acumulativa, el resultado es la curva de Abbott – Firestone, también denominada BAC (del inglés *Bearing Area Curve*) o Curva de la Tasa de la Longitud Portante. En otras palabras, si el valor de la ADF en cada celda (*bin*) es sustituido por la suma de valores de la ADF en dicha celda (*bin*) y en todos los anteriores, se obtiene la *Bearing Area Curve* BAC.

La BAC es generalmente expresada como porcentaje de la longitud de evaluación del perfil, y de esta forma ha sido implementada en *VisualSR2D*.

La figura 97 ilustra la relación entre la ADF y la BAC. La suma de los segmentos b_1, b_2, \dots, b_i dividida por el espaciado (que se supone uniforme) proporciona el número de puntos incluidos para el cálculo de la BAC a una distancia d de la línea de referencia, tratándose así de una distribución acumulativa.

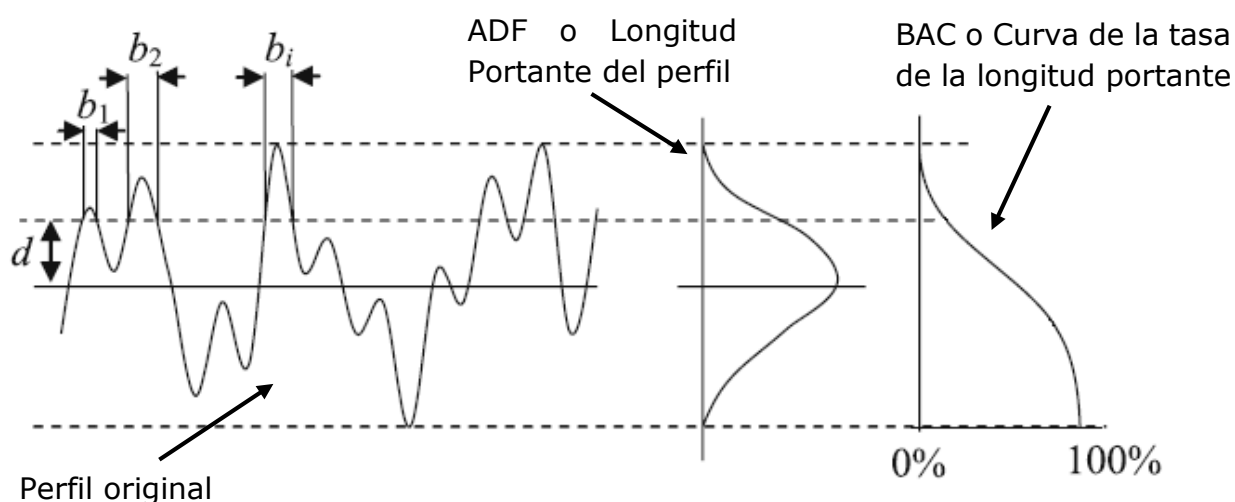


Figura 97. Perfil, ADF y BAC asociadas.

La BAC, curva de Abbott – Firestone o curva de la tasa de longitud portante, de forma similar a la Función de Densidad Espectral PSD juega un importante rol en la caracterización de superficies por métodos estadísticos complementarios a la clásica clasificación por parámetros individuales, lo que es muy útil para poder monitorizar distintos procesos de fabricación o relacionar componentes con funcionalidades (Muralikrishnan & Raja, 2009).

5.9.2 Implementación del módulo *BAC* en *VisualSR2D*

VisualSR2D implementa internamente todos los conceptos tratados en el apartado anterior en el mismo orden en el que han sido presentados.

Así, en primer lugar se definen las variables de entrada al módulo, que son el propio perfil en estudio (ya cargado si se ha accedido al módulo BAC) y el número de celdas verticales (*Bins*) que el usuario desea definir.

De cara al estudio de la ADF, un valor razonable de *bins* es 50. Si el número es menor que 20 no se estará recogiendo bien la variación de puntos en cada una de las celdas por ser éstas demasiado grandes. Por otro lado, aunque podría pensarse que a mayor número de *bins* mayor es la precisión, la realidad es que con valores mayores que 100 el eje vertical será dividido en un número tan grande de celdas que se dificultará su interpretación, ya que, si sigue aumentándose este número, al final cada punto del perfil tendrá su propia celda (véase la figura 99).

No obstante, en el estudio de la BAC o curva de la tasa de la longitud portante del perfil la precisión y facilidad de interpretación que se consigue sí que es mayor cuanto mayor es el número de celdas verticales (*bins*).

El esfuerzo computacional para el cálculo de estas funciones no es demasiado grande, por lo que pueden utilizarse números de *bins* muy altos (hasta 5000 *bins*) y obtener un resultado instantáneo para perfiles normales y utilizando herramientas de procesado comunes.

.

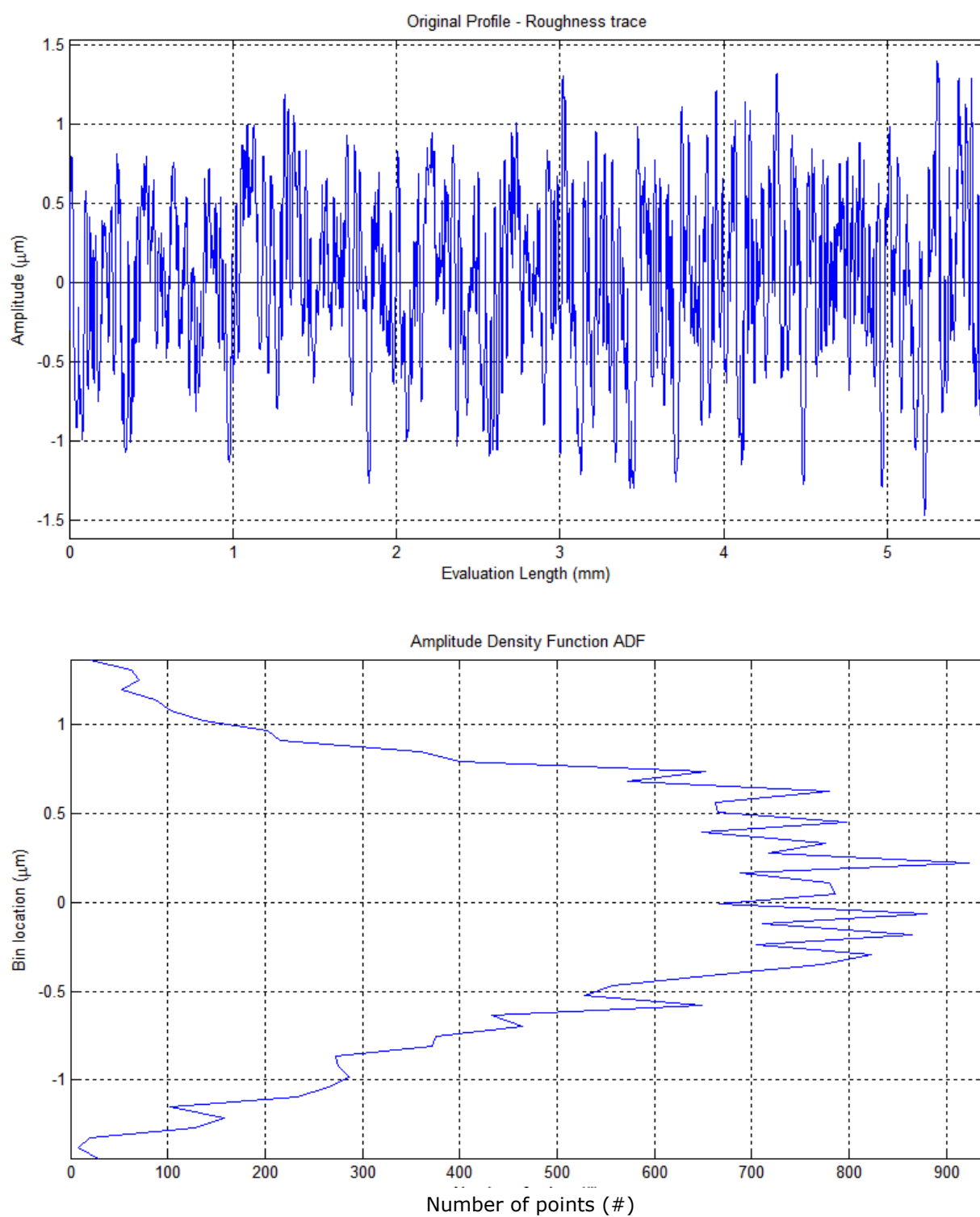


Figura 98. Perfil EDM.smd (arriba) y su función de densidad de amplitud ADF con 50 bins (abajo)

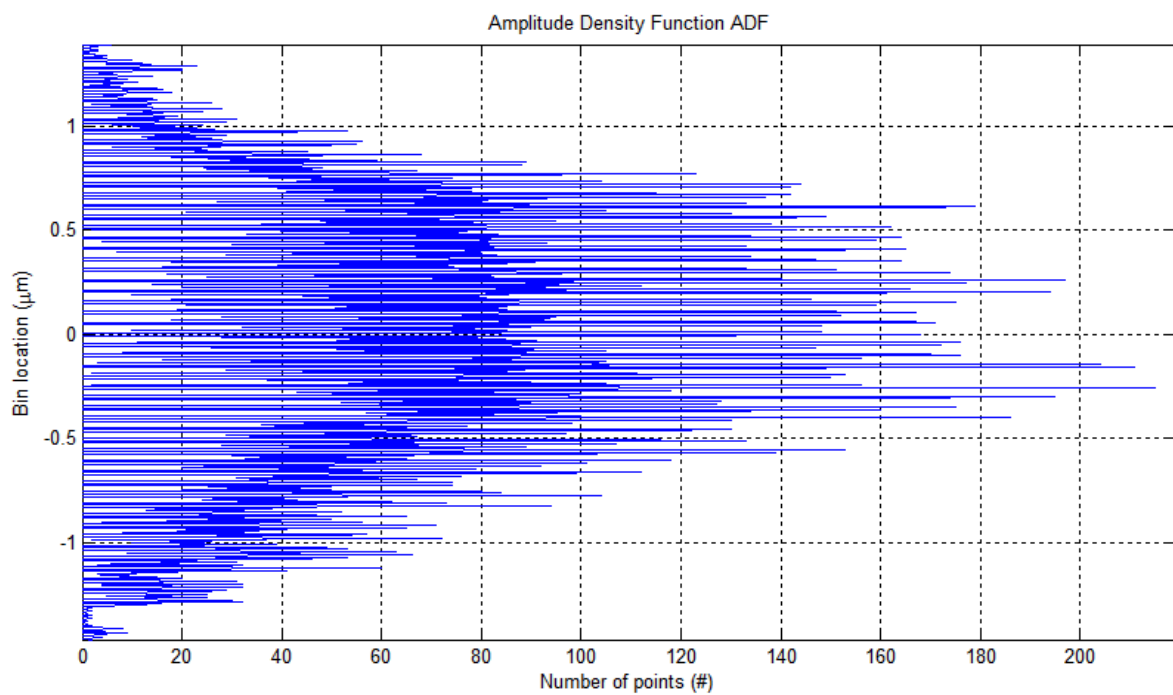
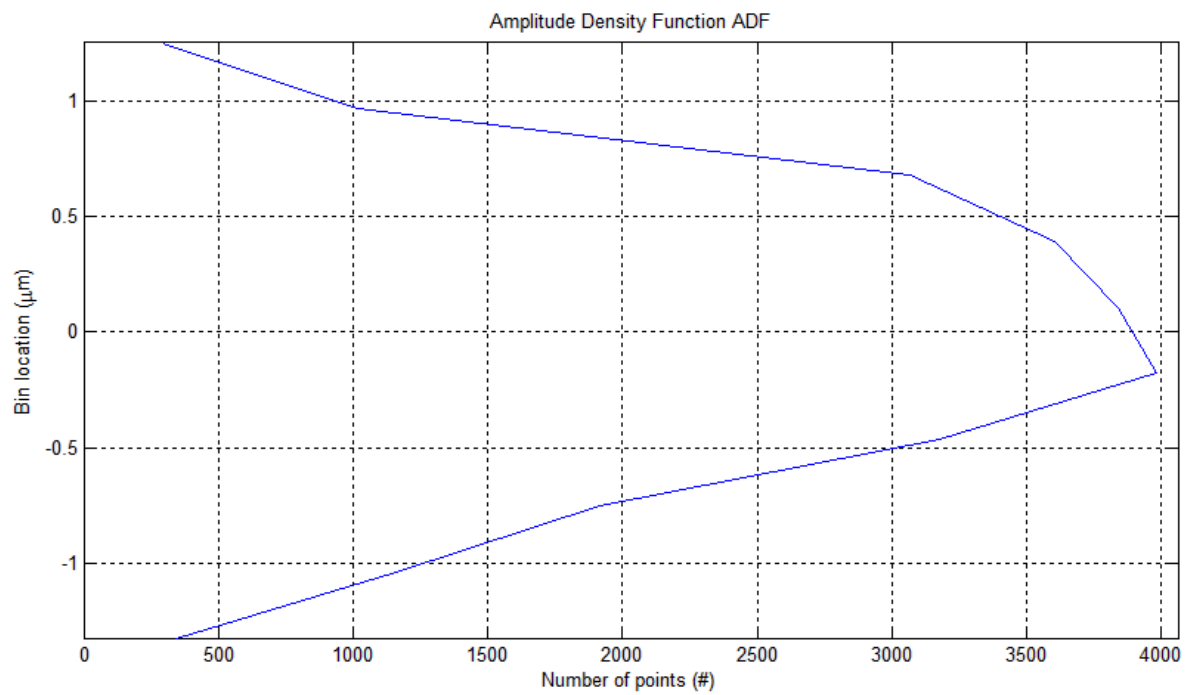


Figura 99. Dificultad en la interpretación de la función ADF del perfil EDM.smd por falta de bins (arriba, 10 bins) y por exceso (abajo, 500 bins)

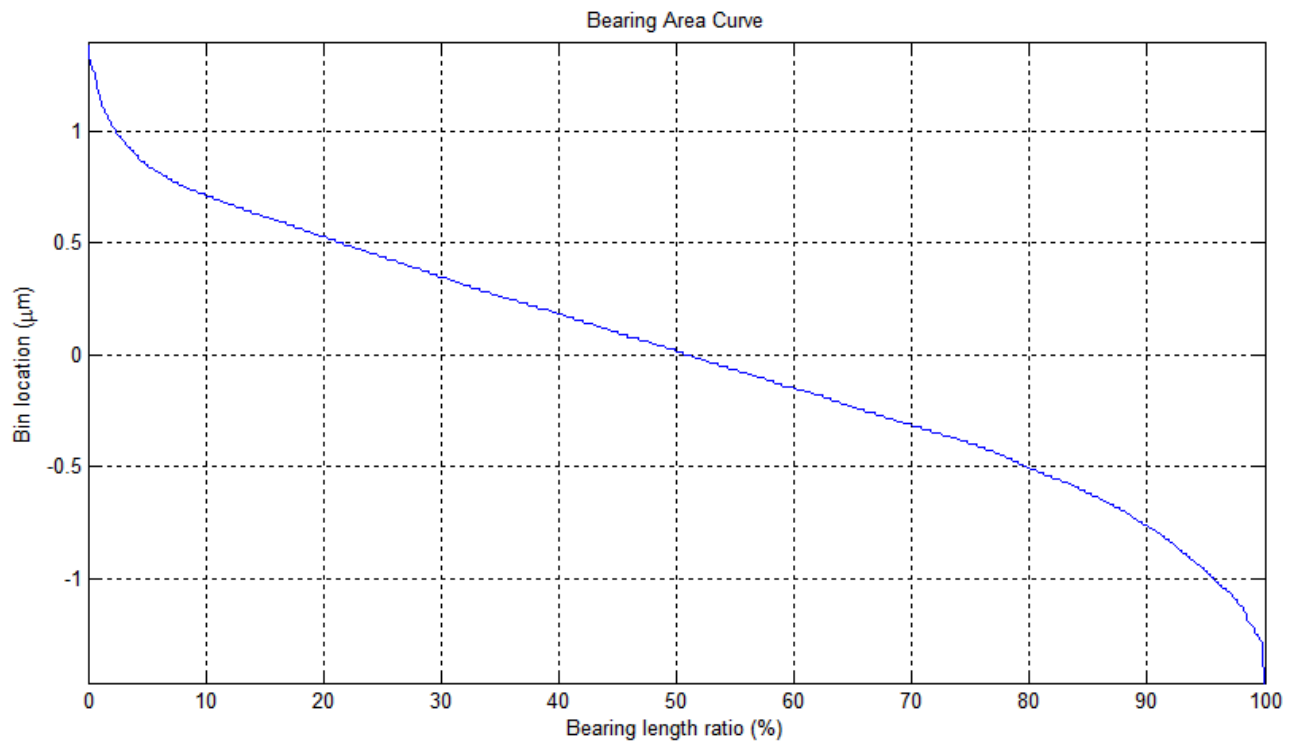


Figura 100. BAC o Curva de la tasa de la longitud portante del perfil EDM.smd

Finalmente, *VisualSR2D* incorpora una función a la que, cuando le es proporcionado un valor de *bearing length ratio* (o tasa de longitud portante del perfil), devuelve la altura respecto a la línea de referencia a la que se da dicho valor, o lo que es lo mismo, la celda (*bin*) a la que pertenece, lo que puede resultar útil como interpolador si está trabajándose con un número reducido de dichas celdas.

En la figura 101 se muestra la interfaz gráfica embebida en *VisualSR2D* para el módulo BAC.

The figure shows a software interface window titled 'BAC'. Inside the window, there are two input fields at the top: 'Number of Bins' with the value '8000' and 'Bin Location in which the bearing length ratio is' with the value '20 %'. Below these are three buttons: 'Calculate ADF', 'Calculate BAC', and 'Calculate'. At the bottom of the window, the result is displayed as 'Bin Location (μm) = 0.52894'.

Figura 101. Interfaz gráfica de *VisualSR2D* en el módulo BAC

5.9.3 Comparativa de resultados del módulo *Bearing Area Curve* con el algoritmo de referencia del *NIST*

El sitio web del *NIST* solamente ofrece la posibilidad de calcular la *Bearing Area Curve* del perfil en función del número de celdas verticales (*bins*).

Una comparación de resultados con *VisualSR2D* para el perfil *EDM.smd* y un número de 1000 *bins* se muestra a continuación.

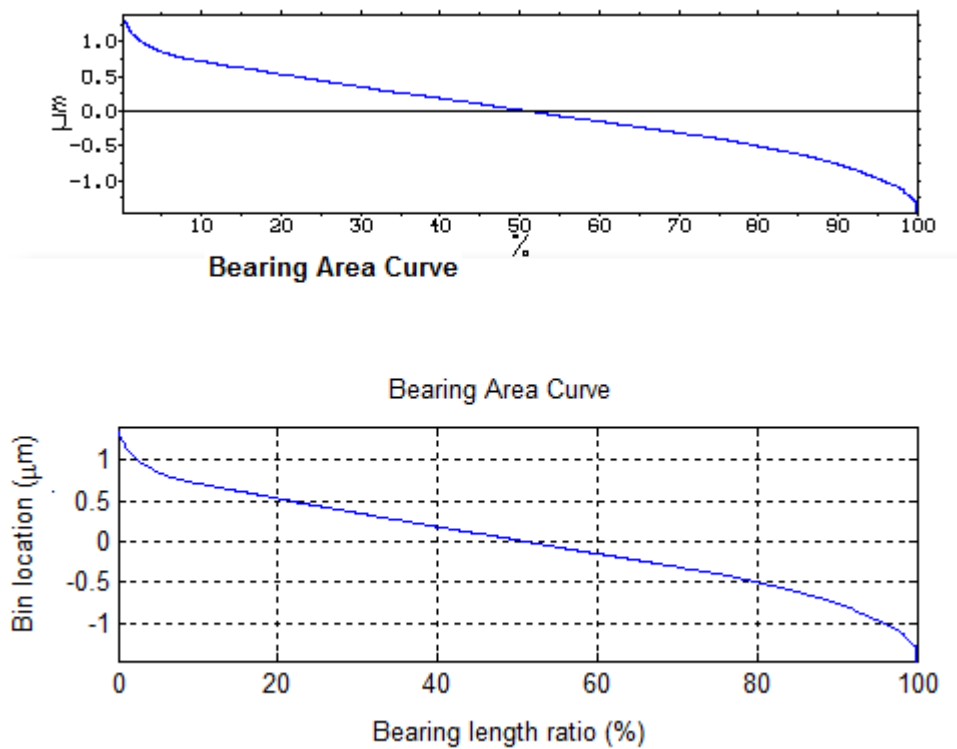


Figura 102. Comparación de las funciones BAC con 1000 bins entre el *NIST* (arriba) y *VisualSR2D* (abajo).

Tanto el *NIST* como *VisualSR2D* permiten la exportación de los datos de la *Bearing Area Curve* para una comparación cuantitativa.

Capítulo 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE DESARROLLO FUTURO

VisualSR2D puede considerarse como el resultado principal de este Trabajo de Fin de Grado. Durante su desarrollo dos factores han sido clave:

- Las distintas Referencias tratadas en el *Capítulo 3: Desarrollos de la norma ISO 5436-2*:
 - Algoritmo del *NIST*
 - Algoritmo del *NPL*
 - Algoritmo del *PTB*
- La Norma ISO 5436-2

Siendo el algoritmo del *NIST* la base principal de las herramientas de análisis 2D que *VisualSR2D* incorpora, mientras que el software del *NPL* y la propia Norma ISO 5436-2 son las referencias fundamentales para el tratamiento de ficheros *.smd* tanto por el módulo de carga como por los distintos módulos de exportación de *VisualSR2D*, entre los que destaca .

Referente a las herramientas de análisis 2D, se han ido presentando a lo largo del *Capítulo 5: Base Teórica de las Herramientas de Análisis de VisualSR2D* numerosas comparaciones con el *NIST*, que han culminado en *5.6 Filtrado y Parametrización. Análisis de Resultados: NIST vs VisualSR2D* con unas discrepancias de resultados más que aceptables entre ambos algoritmos, más aun teniendo en cuenta que han sido desarrollados de forma independiente al no haber tenido acceso al desarrollo interno del *NIST* durante el presente trabajo.

Por otro lado, durante el desarrollo del presente proyecto ha quedado patente la necesidad de una estandarización clara y definida en el contexto de un proceso industrial, fundamentalmente debido a los problemas de tratamiento de información y comparación de resultados que la propia falta de estandarización origina.

Como ejemplos a citar, se han presentado durante este texto numerosos casos de falta de compatibilidad entre las distintas referencias tratadas, lo que si ya es algo relevante teniendo en cuenta que todas las referencias hacen aplicación de una misma norma, todavía se agrava más al considerar que los algoritmos del *NIST*, del *NPL* y del *PTB* suponen el máximo exponente de aplicación de la Norma ISO 5436.

Si por ejemplo el lector intenta cargar en el algoritmo del *NIST* perfiles de la base de datos del *NPL* contenidos en el *CD* adjunto a este texto, observará que el *NIST* no muestra resultados. El problema es el ya tratado en 3.2.3 *Comentarios acerca del algoritmo del NIST* acerca del campo *The_Revision_Number*, en que ficheros provenientes del *NPL* es distinto a “*ISO 5436 – 1999*”, valor aceptado por el *NIST*. Recuérdese también el problema que supuso la modificación sobre la norma básica que el *PTB* realizaba, causando problemas tanto al importar ficheros provenientes de otras fuentes como al ser tratados sus ficheros exportados.

A este respecto, *VisualSR2D* ha sido desarrollado tratando de la compatibilidad con los patrones tipo F2 ya existentes, manteniendo siempre un enfoque abierto y un tratamiento de información en cierto modo flexible. Por otro lado, *VisualSR2D* también ha sido pensado para que cualquier usuario pueda aprovechar al máximo las posibilidades del programa desde un primer momento. Con este fin fue creado *VisualSR2D .smd Generator*, que establece una conexión directa entre los datos de partida y los datos de entrada a las herramientas de análisis existentes en la actualidad.

Tomando como base la figura 3, en la figura 103 se representa la posición que *VisualSR2D .smd Generator* ocuparía en el esquema general de caracterización de acabados superficiales.

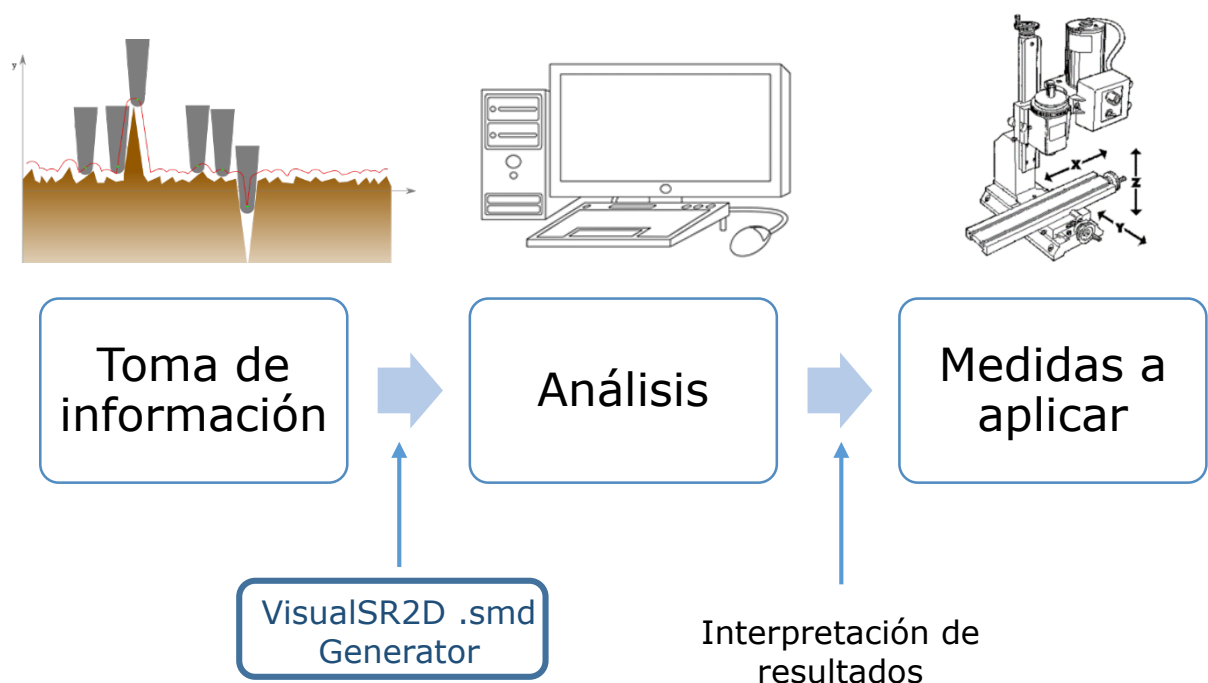


Figura 103. Papel de *VisualSR2D .smd Generator* en el esquema general del estudio del acabado superficial

Haciendo referencia de nuevo a la figura 3, una posible línea de futuro desarrollo del presente trabajo de cara a englobar el conjunto del estudio del acabado superficial pudiera ser tanto el estudio de las técnicas y herramientas actuales para el recabado de información (*lectura* de un perfil/superficie) como de los procesos puramente industriales utilizados para corregir una superficie.

De igual forma, otra línea de mejora de *VisualSR2D* consistiría en el desarrollo de herramientas de análisis de datos tridimensionales, herramientas con las que ya cuenta el *NIST*, por lo que esta referencia continuaría siendo apropiada.

Es también necesario mencionar que la expansión de las características del programa al mundo tridimensional también requeriría cambios en *VisualSR2D .smd Generator*, fundamentalmente de cara al tratamiento del Registro 3 – Datos, si bien la práctica totalidad del desarrollo actual sería aprovechable.

Un problema adicional a este respecto pudiera ser la recopilación de ficheros estandarizados *.smd* con datos tridimensionales, dado que pese a que éste es el formato de referencia establecido por la Norma ISO 5436, la única referencia aquí tratada con aplicación a datos 3D, el algoritmo del *NIST*, utiliza como estándar el formato *.sdf*.

Con todo, *VisualSR2D* se enmarca actualmente entre el algoritmo del *NPL* y el del *NIST*, y se considera que actualmente está preparado para su distribución, en la que los usuarios potenciales serían los mismos que utilizan estos últimos desarrollos.

Esta distribución puede suponer el inicio de un nuevo proyecto en el que el enfoque principal sería la mejora continua del programa, tanto por líneas independientes (como la expansión al 3D) como por el optimizado de sus capacidades actuales, sirviendo de referencia la gran cantidad de información que puede recopilarse a partir de usuarios externos al desarrollo del programa.

REFERENCIAS

American Society of Mechanical Engineers, 2002. *Surface Texture (Surface Roughness, Waviness and Lay)*. New York, NY, USA: ASME.

ASME, 2014. *American Society of Mechanical Engineers*. [Online]
Available at: <https://www.asme.org/>

ASME, 2014. *Who We Are - ASME*. [Online]
Available at: https://www.asme.org/about-asme/who-we-are?cm_re=Home--GlobalHeader--Who%20We%20Are
[Accessed Fifth July 2014].

Czichos, H., Saito, T. & Smith, L., 2006. *Springer Handbook of Materials Measurement Methods*. London: Springer.

Grous, A., 2011. *Applied Metrology for Manufacturing Engineering*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc.

ISO, 2014. *About ISO - ISO*. [Online]
Available at: <http://www.iso.org/iso/home/about.htm>
[Accessed Fifth July 2014].

Leach, R. K. & Harris, P. M., 2002. *Ambiguities in the definition of spacing parameters for surface-texture characterization*. s.l.:s.n.

Marlburg, M., 1996. *A Unified Methodology for the Application of Surface Metrology*. Coventry, UK: University of Warwick.

Mathworks, 2014. *Mathworks*. [Online]
Available at: <http://www.mathworks.es/products/compiler/mcr/>
[Accessed Junio 2014].

Michigan Metrology, 2010. *3D Surface Roughness and Wear Measurement, Analysis and Inspection*. [Online]
Available at: http://www.michmet.com/2d_stylus_parameters_rsm.htm

Muralikrishnan, B. & Raja, J., 2009. *Computational Surface and Roundness Metrology*. London: Springer.

National Physical Laboratory, 2014. *www.npl.co.uk*. [Online].

NIST, 2010. *Tutorials in Optics*. Washington DC: s.n.

NPL, 2014. *Softgauges*. [Online]
Available at: http://161.112.232.32/softgauges/SP_GaussianFilter.htm

Olympus, 2013. *2D Roughness Parameters*. [Online]

Available at: http://www.olympus-ims.com/es/knowledge/metrology/roughness/2d_parameter/

Peklenik, J., 1967. *Investigation of the surface typology*. s.l.:Annals of the CIRP.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2014. *PTB*. [Online]

Available at: http://www.ptb.de/en/org/5/51/517/rptb_web/wizard/greeting.php

Press, W., Flannery, B., Teukolsky, T. & Vetterling, W., 1992. *Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*. 2nd Edition ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Raja, J., 2009. *Computational Surface and Roundness Metrology*. London: Springer.

Rösler, 2012. *Surface Finishing and Preparation*. s.l.:s.n.

Smith, G. T., 2002. *Industrial Metrology: Surfaces and Roundness*. London: Springer.

Smith, J. O., 2007. *Zero Padding Theorem (Spectral Interpolation)*. [Online]

Available at:

http://www.dsprelated.com/dspbooks/mdft/Zero_Padding_Theorem_Spectral.html

Tennant, R., 1992. Mechanical Surface Finishing in the Aerospace Industry. *Aircraft Engineering*, pp. 4-7.

Whitehouse, D., 1994. *Handbook of Surface Metrology*. Philadelphia: Institute of Physics Publishing.

Whitehouse, D. & Reason, 1965. *The Equation of the Mean Line of Surface Texture Found by an Electric Wave Filter*. Leicester, UK: s.n.

Yuan, Y. B. & Vorburger, T. V., 2000. *A Simplified Realization for the Gaussian Filter*, Chemnitz (Alemania): s.n.